

Université de Montréal

**Effets de l'accompagnement sur l'établissement d'espèces  
d'arbres feuillus en plantation sur friches arbustives**

par :

Guillaume Couture

Département de Sciences biologiques  
Faculté des Arts et des Sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.)  
en Sciences biologiques

Mars, 2005

© Couture Guillaume, 2005



QK

3

U54

2005

V. 001

**Direction des bibliothèques**

**AVIS**

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

**NOTICE**

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :  
Effets de l'accompagnement sur l'établissement d'espèces  
d'arbres feuillus en plantation sur friches arbustives

présenté par :  
Guillaume Couture

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Jacques Brisson  
président-rapporteur

André Bouchard  
directeur de recherche

Alain Cogliastro  
codirecteur

Daniel Gagnon  
membre du jury

## Table des matières

Résumé .....	II
Abstract .....	III
Table des matières .....	IV
Liste des tableaux .....	V
Liste des tableaux .....	V
Liste des figures .....	VI
Liste des figures .....	VI
Remerciements .....	VII

## Résumé

Le reboisement d'arbres feuillus au Québec a été identifié par la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise comme une priorité. L'acquisition de connaissances sur les communautés végétales de transition telles les friches arbustives ainsi que sur les modalités permettant leur enrichissement en arbres feuillus suscitent de l'intérêt. En effet, ces milieux peuvent être considérés comme de nouvelles opportunités pour la production de matière ligneuse de haute qualité et pour la réhabilitation de milieux forestiers.

Différents traitements qui produisent un gradient d'intensité d'accompagnement en périphérie de plants reboisés sur friches arbustives sont analysés dans cette étude. L'objectif général est de comprendre et d'optimiser les effets positifs de la proximité spatiale d'un accompagnement par des espèces arbustives sur les plants reboisés. À partir d'un débroussaillage préalable par bande, appliqué dans deux communautés arbustives, le dégagement total de la végétation à la périphérie immédiate du plant est comparé à un dégagement limité à la cime des arbres installés au centre des bandes. Un troisième traitement positionne les plants d'arbres à l'intérieur de l'interbande dans une trouée aménagée. Après deux années de croissance, les taux de survie ont été élevés pour les espèces à l'étude, le cerisier tardif, le chêne à gros fruits, l'érable à sucre et le noyer noir, dans tous les traitements. Aucun des traitements n'a montré un avantage concernant la croissance des plants malgré des différences significatives au niveau de l'importance de la végétation d'accompagnement en périphérie des plants et de la quantité de lumière disponible. Toutefois, une modification morphologique du rapport hauteur totale/diamètre au collet des plants en fonction de l'intensité de l'accompagnement a été constatée sur un des deux sites. Le maintien d'une végétation ligneuse compagne en périphérie des plants d'arbres reboisés constitue une intervention sylvicole intéressante pour la plantation de feuillus à bois noble sur friches arbustives. Il sera important de surveiller l'évolution de la végétation d'accompagnement et ses effets sur le milieu de croissance, de manière à bien définir les modalités qui avantagent le développement des jeunes plants d'arbres.

Mots clés : plantation, feuillus à bois noble, facteur d'élancement, approche par voisinage, compétition, accompagnement, friches arbustives, sylviculture, établissement.

## Abstract

The use of hardwood species for reforestation in Quebec was identified by the Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise as a priority. The acquisition of knowledge on the early successional communities such as shrublands and on methods allowing their enrichment in hardwood species are of interest. Indeed, these environments can be regarded as new opportunities for the production of high quality wood and for forest rehabilitation.

Different treatments which express a gradient of neighbourhood density in periphery of seedlings planted on shrublands are analyzed in this study. The general objective is to understand and optimize the positive effects of the spacial proximity of a neighbourhood composed of shrubby species on the planted tree seedlings. A release of the living crown of the seedlings by an opening of shrubby canopy is compared with a total clearing of the concurrent vegetation present in the immediate vicinity of the seedlings on two sites. After two years of growth, the studied species, black cherry, black walnut, bur oak and sugar maple, have obtained high survival rates in all treatments. None of the treatments showed an advantage concerning the growth of the seedlings in spite of significant differences on the level of the importance of the neighbourhood vegetation in the periphery of the seedlings and the quantity of light available. However, a morphological modification of the slenderness index of the seedlings according to the density of the neighbourhood was observed on one of the two sites. The preservation of a neighbourhood vegetation in the periphery of tree seedlings constitutes an interesting silviculture option for valuable hardwood plantations on shrublands. It will be important to monitor the renewal of the neighbourhood vegetation and these effects on the growth environment in order to define the conditions that are advantageous to the development of the tree seedlings.

Keywords : plantation, valuable hardwoods, slenderness index, neighborhood approach, competition, neighbourhood, shrublands, silviculture, establishment.

## Table des matières

Introduction.....	1
Méthodologie .....	7
Description du territoire d'étude .....	7
Description des sites d'étude .....	8
Dispositif expérimental, traitements et espèces plantées .....	10
Échantillonnage .....	12
Choix des arbres échantillons de l'effectif expérimental .....	12
Conditions des sols.....	13
Variable environnementale – La lumière .....	13
Variable environnementale - La végétation à la périphérie des plants.....	14
Variable environnementale – L'humidité du sol .....	16
Variable réponse - La croissance.....	16
Variable réponse - La fluorescence.....	17
Méthodes d'analyses statistiques .....	18
Résultats et discussion .....	20
Caractéristiques de la végétation ligneuse en reprise .....	20
Espèces ligneuses communes aux deux sites .....	20
Espèces ligneuses propres au site Caza .....	20
Espèces ligneuses propres au site Trépanier.....	21
Étude des variables environnementales .....	21
Densité du flux de photons photosynthétiques disponibles (%DFPP).....	21
Importance de la végétation d'accompagnement en périphérie des plants .....	22
Humidité du sol .....	24
Étude de la croissance des jeunes plants d'arbres .....	25
Bilan de survie .....	25
Effets des traitements sur la croissance des arbres plantés.....	27
Effets des traitements sur le taux de fluorescence chlorophyllienne.....	29
Effets des variables environnementales sur les variables biotiques .....	30
Résultats de la RDA polynomiale.....	30
Conclusion.....	34
Bibliographie.....	37



## Liste des tableaux

Tableau I : Caractéristiques générales du dispositif expérimental.....	i
Tableau II : Principales caractéristiques des traitements à l'étude.....	ii
Tableau III : Distribution des plants par espèce, par traitement et par site.....	ii
Tableau IV : Interventions sylvicoles réalisées en 2002 et en 2003 .....	iii
Tableau V : Distribution des effectifs par espèce, par traitement et par site.....	iii
Tableau VI : Fréquence de plants associés à chaque classe d'indice de l'importance de la végétation d'accompagnement par traitement et par site en 2003.....	iv
Tableau VII : Recouvrement moyen en espèces herbacées et ligneuses en périphérie des plants reboisés et effet des traitements par site en 2003.....	iv
Tableau VIII : Nombre de plants morts (M) et vivants (V) par espèce d'arbres, par traitement, par site et par année .....	v
Tableau IX : Hauteur totale moyenne des plants de l'effectif et effet des traitements par espèce, par site et par année.....	vi
Tableau X : Diamètre au collet moyen des plants de l'effectif et effet des traitements par espèce, par site et par année.....	vii
Tableau XI : Taux moyen de fluorescence chlorophyllienne et effet des traitements par espèce et par site en 2003.....	viii
Tableau XII : Synthèse des résultats obtenus de l'analyse canonique de redondance polynomiale par espèce et par site.....	viii

## Liste des figures

Figure 1 : Localisation du territoire d'étude et des sites de plantation Caza et Trépanier	ix
Figure 2 : Représentation des deux scénarios de dégagement de la cime du plant appliqués au sein des traitements accompagné et trouées nord et sud	x
Figure 3 : Représentation 2D des traitements du dispositif expérimental	xi
Figure 4 : Profil des quatre traitements	xii
Figure 5 : Représentation 3D des traitements du dispositif expérimental	xii
Figure 6 : Représentation schématique de mesures de distances utilisées dans le calcul de l'indice de compétition	xiii
Figure 7 : Ordination de l'AFC de la végétation d'accompagnement ligneuse en reprise	xiv
Figure 8 : Proportion de densité de flux de photons photosynthétiques (%DFPP) moyenne mesurée à 50cm du niveau du sol selon le traitement et sur chaque site en 2002 et en 2003	xv
Figure 9 : Proportion de densité du flux de photons photosynthétiques (%DFPP) moyenne des différents traitements selon un profil déterminé de hauteur et sur chaque site en 2003	xv
Figure 10 : Hauteur moyenne de la compétition ligneuse en périphérie des plants (après dégagement) par traitement et par site (juillet 2003)	xvi
Figure 11 : Humidité du sol après trois et sept jours consécutifs sans pluie en périphérie des plants par traitement et par site (août 2003)	xvi
Figure 12 : Bilan de mortalité 2002-2003 par traitement, par espèce et par site	xvii
Figure 13 : Longueur moyenne de la pousse annuelle des plants par espèce, par traitement et par site en 2003	xvii
Figure 14 : Rapport hauteur totale/diamètre au collet des plants (H/D) moyen par espèce, par traitement et par site en 2003	xviii
Figure 15 : Ordinations de la RDA <sub>p</sub> des variables biotiques en fonction des variables environnementales par espèce pour le site Caza	xix
Figure 16 : Ordinations de la RDA <sub>p</sub> des variables biotiques en fonction des variables environnementales par espèce pour le site Trépanier	xx

## Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à messieurs André Bouchard (directeur) et Alain Cogliastro (codirecteur) pour leur appui, leur générosité ainsi que pour la confiance qu'ils m'ont témoignée tout au long de ces deux dernières années. De même, je souhaite remercier tous les membres du laboratoire d'écologie de l'Institut de recherche en biologie végétale et particulièrement mon collègue Alain Paquette pour ses conseils judicieux et son grand dévouement. Je trouve également essentiel de souligner l'apport important des aides de terrain suivants : Aude Fournier, Sara Bastien, André-Jean Lalanne, Marie-Andrée Vaillancourt, Éric Paquette, et Pierre-Olivier Roy. La réalisation des analyses statistiques a été menée à terme grâce à la précieuse collaboration de Stéphane Daigle. Finalement, une pensée toute spéciale va à Emmanuelle Jarry, ma compagne de vie, qui m'a encouragé tout au long de mes travaux de maîtrise.

Le projet de recherche a été rendu possible grâce au support financier du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT), par le biais de ses programmes Action concertée et Programme de recherche en équipes, et du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), par l'entremise de subventions de recherche octroyées à André Bouchard, Ph.D. L'établissement des dispositifs expérimentaux sur propriété privée a été appuyé financièrement par le Programme d'aide financière à la mise en valeur des forêts privées administré par l'Agence forestière de la Montérégie selon les prescriptions réalisées par l'ingénieur forestier René Dulude et par le Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier – Volet II du Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs. De plus, le projet a été mené à bien grâce à la collaboration de MM. Pierre Caza et Marius Trépanier, propriétaires des terrains sur lesquels le dispositif de recherche fut installé. Finalement, il faut mentionner la précieuse collaboration de l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) et du Jardin botanique de Montréal, pour les facilités offertes dans la réalisation des travaux de recherche et l'accès à l'Herbier Marie-Victorin.

## Introduction

Depuis le début des années 90, la perte annuelle nette des superficies forestières mondiales se chiffre à 0,22% (FAO, 2001). La dégradation des forêts, par des pratiques forestières inappropriées et par une surexploitation des ressources de la forêt, accentue ce phénomène en affectant grandement la biodiversité (FAO, 2001). À une autre échelle, d'autres facteurs modifient l'affectation des terres ainsi que sa composition végétale. L'abandon des terres agricoles, observé principalement au sein des pays industrialisés (Domon *et al.* 1993; Orwig et Abrams, 1994; Tatoni et Roche, 1994), entraîne l'établissement de nouvelles communautés végétales parmi lesquelles on retrouve les arbustaies. Par exemple, sur les dépôts glaciaires d'un secteur du sud-ouest du Québec, 35% de la superficie a été abandonnée par l'agriculture au cours du 20<sup>ème</sup> siècle (Pan *et al.* 1999).

Les facteurs environnementaux et les processus historiques sont importants dans la compréhension des patrons de végétation actuelle des zones périurbaines du sud du Québec (Pan *et al.* 1999; de Blois *et al.* 2001). L'étude de la région du Haut-Saint-Laurent révèle que la végétation actuelle s'éloigne passablement du climax classique des forêts précoloniales par un grand nombre d'espèces d'arbres intolérantes à l'ombre, ainsi que la présence de nombreux sites ouverts (Bergeron *et al.* 1988; Brisson *et al.* 1988; Bouchard *et al.* 1989). En effet, le remplacement d'un système naturel par un autre contrôlé par les perturbations anthropiques a fortement influencé la composition et la productivité forestière de l'ensemble des forêts de cette région (Bergeron *et al.* 1988; Bouchard *et al.* 1989; Simard et Bouchard, 1996). C'est ce processus qui aurait favorisé des espèces de début de succession au détriment d'espèces de fin de succession (Brisson *et al.* 1988; Meilleur *et al.* 1992; Stover et Marks, 1998). De plus, ce changement a créé des communautés d'arbustes et d'arbres normalement absentes, ou du moins très restreintes lorsque les processus écologiques naturels prévalaient (Bouchard et Domon, 1997). Notamment par leur potentiel élevé d'inhibition de la succession vers la forêt (Meilleur *et al.* 1994), certains arbustes tels le frêne épineux (*Zanthoxylum americanum*), l'aubépine (*Crataegus* spp.) et le vinaigrier (*Rhus typhina*) sont capables de former des communautés stables dans le sud du Québec. L'abandon progressif, notamment dans les trente dernières années, de certaines pratiques agricoles sur les dépôts glaciaires, dont le pâturage, a accentué l'apparition des

arbustaies. Ces terres abandonnées par l'agriculture, présentent néanmoins une opportunité d'enrichissement en espèces d'arbres feuillus sur un territoire où le paysage forestier est à refaire (Bouchard et Domon, 1997).

À cause de l'augmentation de la population mondiale et de la demande toujours croissante en produits forestiers, il y aurait avantage à reconstituer un capital forestier de qualité. Dans plusieurs régions de la zone des feuillus, la plantation d'espèces d'arbres feuillus à bois noble pourrait représenter une solution à la perte croissante des superficies forestières et à une possible rupture dans les stocks de matière ligneuse (FAO, 2001). Favorisé par des conditions climatiques tempérées, un grand nombre de degrés jours et par ses sols fertiles, le territoire méridional du Québec représente une région à fort potentiel pour l'intensification des activités sylvicoles (Bouchard et Domon, 1997). En se basant sur les caractéristiques physiques et spatiales, il est possible de prédire les sites les plus susceptibles d'évoluer vers une vocation forestière (Pan *et al.* 1999). Ces sites pourraient recevoir une intervention d'enrichissement en feuillus par la plantation. Ces connaissances, jumelées à celles des exigences écologiques des espèces forestières en plantation, permettront de dicter les interventions humaines pour la restauration d'un paysage forestier composé d'une forêt de feuillus nobles à forte valeur commerciale.

Cogliastro *et al.* (1993; 1997) ont abordé, avec succès, la plantation en champs abandonnés avec un objectif d'accélération de la succession végétale dirigée vers un peuplement composé de feuillus de haute valeur commerciale. Plusieurs espèces ont montré un grand potentiel pour la reconstitution des forêts feuillues du sud-ouest du Québec lorsque ces dernières bénéficiaient de conditions édaphiques favorables (Cogliastro *et al.* 1997; 2003). Devant cette réussite sylvicole, la question de la régénération artificielle en feuillus de haute valeur des communautés arbustives de transition fut posée. Lorsque ces communautés sont aménagées, elles le sont fréquemment selon une pratique qui procède par un dégagement total de la parcelle et une mise en andain préalable à la plantation, surtout en arbres résineux. Toutefois, avec l'objectif d'accélérer et de diriger la succession végétale, des essais utilisant des arbres feuillus ont été initiés afin de vérifier le potentiel de régénération artificielle sous différentes communautés arbustives (Benjamin, 2000).

Dans les différentes modalités de ces dispositifs, les feuillus plantés ont connu une excellente survie après trois ans (Benjamin, 2000). Par ailleurs, l'évolution des conditions de lumière et d'évapotranspiration, et la dynamique de la végétation en fonction des traitements, présagent une différenciation de la croissance des espèces plantées. Cette hypothèse rend essentielle la poursuite d'un programme de recherche. En ce sens, la relation entre la croissance et la disponibilité de la lumière de plants feuillus établis sous le couvert de communautés arbustives fut étudiée (Fournier, 2003). L'analyse comparée des effets d'un débroussaillage total et d'un débroussaillage par bande sur la croissance a montré l'efficacité de la méthode alternative (débroussaillage par bande) pour le dégagement des arbres feuillus en plantation; celle-ci induit des conditions de lumière atténuée au cours du temps en comparaison à une forte disponibilité initiale qui diminue rapidement lors du dégagement total. La croissance des plants d'arbres sous un traitement de débroussaillage par bande était égale ou supérieure à celle d'un traitement de débroussaillage total (Fournier, 2003).

Le débroussaillage par bande peut représenter différents degrés de proximité entre la végétation résiduelle et les arbres plantés. La compréhension des effets de la distribution de la végétation ligneuse laissée en place relativement à la position de la régénération artificielle dans une communauté arbustive aménagée par bandes est nécessaire pour détailler l'intervention sylvicole. Il devient donc intéressant de développer un projet de recherche visant une meilleure connaissance des effets de divers aménagements par bandes des milieux arbustifs afin de comprendre comment la végétation voisine des plants affecte leur croissance.

La plantation par bande est utilisée comme traitement sylvicole préalable à la plantation d'essences d'arbres feuillus dans les forêts tropicales (Adjers *et al.* 1995; Montagnini *et al.* 1997; Pena-Claros *et al.* 2002). Ce type d'aménagement est également rencontré en Amérique du Nord lors d'activités d'enrichissement en feuillus nobles (Minckler *et al.* 1973; Martin et Hornbeck, 1989; Smith et Ashton, 1993) et en résineux (Wagner et Radosevich, 1998), dans des forêts matures. L'ambiance forestière créée par le maintien d'une végétation d'accompagnement pourrait modifier la quantité et la qualité de la lumière parvenant aux jeunes plants (Ballaré *et al.* 1990; Cannell et Grace, 1993; Schmitt et Wulff, 1993; Messier *et al.* 1998), les conditions climatologiques diurnes (Barg et Edmonds, 1999; Man et Lieffers, 1999), l'humidité de l'air (Collet et Frochot, 1992), la forme des arbres (Harper, 1961; Hubert, 1987; Beaudet et Messier, 1998; Schütz, 2001;

Pommerening et Murphy, 2004), la compétition périphérique (Goldberg, 1987; Goldberg et Landa, 1991; Putz et Canham, 1992; Lieffers *et al.* 1993; Truax *et al.* 2000; Carnevale et Montagnini, 2002; Agestam *et al.* 2003), la teneur en eau du sol (Childs et Flint, 1987), les différents nutriments du sol (Binkley, 1984; Kim *et al.* 1995; Prescott, 1997), la prédation (Morgan, 1991; Truax *et al.* 2000) et les dommages associés au gel (Langvall et Orlander, 2001; 2002). De plus, des avantages économiques associés à la réduction de l'application d'herbicide et à des coûts moins élevés de débroussaillage pourraient découler d'une approche de plantation, avec accompagnement de la végétation en place, dans les arbustaies.

Le terme accompagnement est relativement récent, ce qui explique la quantité d'autres termes encore utilisés, touchant de plus ou moins près à l'accompagnement au sens strict, tel que défini ci-dessous : le voisinage (Mack et Harper, 1977), la végétation d'accompagnement (Hubert, 1987), l'essence secondaire (Bernard, 1987), le mélange subordonné (Schütz, 1990), la végétation accessoire (Denis, 1991), le bourrage (Becquey, 1992), l'arbre auxiliaire (Hubert, 1992) ou encore l'ambiance forestière (Becquey, 1997). La plupart de ces définitions se réfèrent à l'accompagnement cultural et décrivent la constitution d'un peuplement en distinguant les arbres-objectifs et l'accompagnement. Ainsi, dans ce mémoire, le terme accompagnement se réfère à la végétation ligneuse en place qui accompagne les arbres-objectifs pendant leur établissement. Les arbres-objectifs, quant à eux, réfèrent aux plants d'arbres reboisés et qui constitueront le peuplement d'avenir. Il s'agit donc de toute la végétation ligneuse présente avec et/ou sans précision des essences, des distances, de l'origine, des rôles, etc. Enfin, les termes accompagnement, compétition et facilitation sont strictement liés, car le principal rôle de l'accompagnement est cultural, basé sur les effets de l'interaction qui entraîneraient des effets favorables ou non à l'arbre-objectif (Berkowitz *et al.* 1995; Callaway et Walker, 1997; Li et Wilson, 1998).

Plusieurs méthodes ont été développées pour étudier les interactions entre les végétaux. Weigelt et Jolliffe (2003) présentent une revue exhaustive de plus de 48 indices utilisés pour quantifier l'intensité de la compétition, les effets de la compétition ou les résultats à long terme de la compétition dans un milieu donné. Or, le développement de modèles de voisinage et/ou d'indices de compétition pour l'étude de l'influence de l'environnement sur un individu a poussé le besoin de compréhension des processus écologiques à l'échelle de l'individu (Harper, 1977; Mack et Harper, 1977; Weiner, 1982). Ces outils

présentent des avantages par rapport aux approches conventionnelles car ils permettent de quantifier, selon les paramètres spatiaux d'une végétation d'accompagnement, l'influence de la compétition sur la réponse d'un individu (Silander et Pacala, 1985; Pacala, 1986; Firbank et Watkinson, 1987; Benjamin, 1993; Wagner et Radosevich, 1991; Bergelson, 1993). De plus, ces approches ont été utilisées pour augmenter la compréhension des processus de compétition dans la structure des peuplements forestiers (Weiner, 1984). Par contre, selon certains auteurs, l'interprétation de la réponse d'un individu face à la compétition pourrait dépendre du moyen utilisé pour mesurer la végétation d'accompagnement (Freckleton et Watkinson, 1997; 1999).

Le présent projet de recherche porte sur la compréhension des effets de différents modes de gestion de la végétation ligneuse d'accompagnement sur l'établissement d'espèces d'arbres feuillus plantés au sein d'arbustaies. Le but de cette étude est d'analyser certaines conditions environnementales engendrées par la végétation d'accompagnement en place et de mesurer leurs effets sur la croissance et le développement de plants d'arbres feuillus établis au sein de communautés arbustives de transition sur un dépôt glaciaire. Ainsi, à partir de communautés arbustives aménagées par bandes, les objectifs spécifiques de recherche poursuivis sont d'analyser sur deux sites les effets de trois traitements qui induisent différents degrés d'influence de la végétation d'accompagnement sur les plants d'arbres feuillus de quatre espèces.

L'analyse porte sur *i)* l'importance de la végétation ligneuse d'accompagnement, les conditions de lumière disponible et l'humidité du sol, ainsi que sur *ii)* la survie et la croissance des arbres plantés (hauteur totale, diamètre au collet, longueur de la pousse annuelle, la largeur de la cime du plant et le rapport hauteur totale/diamètre au collet) et la fluorescence chlorophyllienne, mesurées durant les deux premières années de croissance, soit la période d'établissement des plants. Les quatre espèces à l'étude sont: le cerisier tardif (*Prunus serotina* Ehrh.), le chêne à gros fruits (*Quercus macrocarpa* Michx.), l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et le noyer noir (*Juglans nigra* L.).

Les hypothèses de recherche sont que les effets potentiels d'une végétation d'accompagnement pourraient comprendre : une réduction de la compétition herbacée périphérique, une augmentation de l'eau disponible dans le sol, une diminution de la quantité de lumière disponible au jeune plant d'arbre, une augmentation du taux de



survie moyen des plants et une modification de la croissance du plant d'arbre (rapport hauteur totale/diamètre au collet).

En conséquence, cette recherche compte contribuer à une mise en valeur des sites en déprise agricole et déficients en régénération naturelle d'espèces d'arbres feuillus de grande valeur économique. De plus, l'étude cherche à comprendre et à optimiser les effets positifs du potentiel d'accompagnement des espèces composant les arbustaies développées après l'abandon des activités agricoles. Une connaissance adéquate de la dynamique de la végétation des communautés de transition permettra de prédire les effets des différents modes de débroussaillage et d'améliorer son efficacité à favoriser l'établissement d'arbres feuillus selon la périodicité, l'intensité et la localisation de son application.

## Méthodologie

### *Description du territoire d'étude*

La Municipalité Régionale de Comté (MRC) du Haut-Saint-Laurent comprend le territoire d'étude. Cette dernière est située dans la région forestière des Grands-Lacs et du Saint-Laurent (Rowe, 1972). Ce territoire est localisé à l'extrême sud-ouest du Québec et est bordé par le fleuve Saint-Laurent au nord-ouest et par la frontière de l'état de New York (États-Unis) au sud (Figure 1).

D'un point de vue écologique, la colonisation tardive du territoire et l'exploitation des ressources de la forêt de 1795 à 1900 ont transformé progressivement la composition et la distribution des forêts du Haut-Saint-Laurent (Bouchard et Domon, 1997; Brisson et Bouchard, 2003). Au cours des années 1800, on assiste à une véritable exploitation en essences forestières de feuillus à bois noble si bien qu'environ 60 années auront suffi pour que se fasse sentir les signes d'épuisement de la ressource. Ainsi, les années 1870 sont marquées par l'arrêt des ventes de bois sur ce territoire appauvri en essences forestières de qualité (Simard et Bouchard, 1996). De plus, au 19<sup>ème</sup> siècle, l'agriculture québécoise, en forte croissance, se déploie systématiquement sur tous les types de milieux, aussi bien les milieux morainiques (pierreux) que les milieux marins (plaines argileuses) (Paquette et Domon, 1997). Aujourd'hui, cette région, la plus chaude de la province, est classée dans le domaine bioclimacique de l'Érablière à caryer cordiforme (Grandtner, 1966).

La géologie de la MRC du Haut-Saint-Laurent est constituée principalement de deux grands groupes. Situé à l'ouest, le Groupe de Beekmantown (Ordovicien inférieur : environ 500 millions d'années) est composé de dolomies tandis qu'à l'est, le Groupe de Postdam (Cambrien : environ 570 à 500 millions d'années) est caractérisé de grès (Globensky, 1987). Le matériel transporté par les différents événements glaciaires du quaternaire puis déposé avec la fonte de la glace constitue une matrice hétérogène de différentes tailles de particules d'argile jusqu'aux cailloux. Finalement, une grande diversité de dépôts de surface est présente dans la MRC du Haut-Saint-Laurent. Cette mosaïque comprend principalement un mélange de dépôts : littoraux, marins, glaciaires et tardiglaciaires (Bariteau, 1988; Delage, 1998).

La saison de croissance de la MRC du Haut-Saint-Laurent jouit de conditions exceptionnelles au Québec telles : une période annuelle sans gel de 208 jours et 2182 degrés-jours (au-dessus de 5°C) par année (Environnement Canada, 2002). Entre 1971 et 2000, la moyenne annuelle des températures enregistrées à la Station météorologique de Huntingdon (45°02' N, 74°08' W) s'élevait à 6,7°C, alors que les moyennes mensuelles de janvier et de juillet atteignaient -9,1°C et 21,3°C, respectivement (Environnement Canada, 2002). La Station météorologique de Huntingdon a été retenue au profit de la Station météorologique de Saint-Anicet afin de permettre la comparaison entre les normales mensuelles de température et des précipitations calculées entre 1971 et 2000.

En 2002, année d'établissement du dispositif, la saison de croissance pour les mois de mai, juin et octobre fut plus fraîche que la normale calculée pour les mêmes mois entre 1971 et 2000. Les écarts observés sont de l'ordre de -2,8°C, -1,9°C et -1,9°C, respectivement. Par contre, la température, pour le mois de septembre, fut légèrement supérieure à la normale (+1,8°C). Globalement, en 2002, l'été fut beaucoup plus sec, notamment pour les mois de juillet et août, où la moyenne des précipitations s'élevait respectivement à 42,0% et 36,6% de la normale calculée entre les années 1971 et 2000 (Environnement Québec, 2003). En 2003, le début de la saison de croissance fut légèrement plus frais tandis que les derniers mois de la saison de croissance furent plus cléments en comparaison à la normale des températures. Les écarts observés, pour l'ensemble de la saison de croissance sont de l'ordre de -0,6°C, -1,0°C, -0,3°C +1,2°C et +1,5°C respectivement pour les mois de mai, juin, juillet, août et septembre (Environnement Québec, 2003). Finalement, en 2003, l'été fut légèrement plus sec à l'exception du mois de mai où la moyenne des précipitations s'élevait à 162% de normale calculée entre les années 1971 et 2000 (Environnement Québec, 2003). Les pourcentages de la normale observés pour les mois de juin, juillet, août et septembre étaient de 79%, 76%, 53% et 80%, respectivement (Environnement Québec, 2003).

### ***Description des sites d'étude***

En se basant sur les caractéristiques physiques et spatiales, il est possible de prédire que les dépôts glaciaires sont parmi les plus susceptibles de maintenir ou de se diriger

vers une activité forestière (Pan *et al.* 1999). Le choix d'intensifier la productivité forestière sur des dépôts morainiques est en accord avec leur vocation forestière (Bouchard et Domon, 1997) alors que les activités agricoles sont aujourd'hui concentrées sur les dépôts marins (Paquette et Domon, 1997). Les dépôts glaciaires ont donc été ciblés comme milieux à fort potentiel pour un enrichissement en feuillus nobles. Dans le but d'optimiser les interventions de boisement des terres agricoles abandonnées appliquées sur ce type de dépôt, il est nécessaire d'intégrer l'effet des différentes conditions de sol rencontrées. Ainsi, deux sites de 0,5 et 1,5 hectare aux sols semblables (deux brunisols mélaniques) et de composition végétale différente, situés au sein de la municipalité de Saint-Anicet, ont été choisis (Figure 1). Chacune des plantations a été nommée selon le nom du propriétaire du terrain (Caza et Trépanier). Les coordonnées géographiques pour les sites Caza et Trépanier sont respectivement 45°06'11"N, 74°18'31"W et 45°07'11"N, 74°20'33"W. Les sites sont distants de 3,4 kilomètres et situés le long de crêtes morainiques provenant d'un même événement glaciaire (Delage, 1998).

Les sites ont une végétation de friche arbustive issue d'anciens pâturages. La composition floristique d'origine y est semblable ; le frêne épineux domine, accompagné principalement du nerprun bourdaine (*Rhamnus catharticus*) (Tableau I). L'âge moyen des arbres ou des arbustes dominants de la communauté est de 27 ans et 36 ans respectivement pour les sites Caza et Trépanier (Tableau I). Le moment d'abandon de l'activité agricole de chacun des sites différerait donc d'une dizaine d'années. Cette différence d'âge est également associée à une différence de hauteur moyenne de la communauté d'origine de plus de 2 mètres. En effet, la hauteur moyenne est de 5 mètres pour le site Caza et de 7,5 mètres pour le site Trépanier (Tableau I). L'hétérogénéité plus grande de la hauteur moyenne de la communauté d'origine (Tableau I) pour le site Trépanier, le plus âgé, s'exprime par la présence accentuée de jeunes arbres émergeant de la strate arbustive comparativement au site Caza.

Les analyses chimiques réalisées dans l'horizon de surface (Ah) indiquent que les teneurs en éléments échangeables (K, Mg, Ca, Al et P), et par conséquent la capacité d'échange cationique (CEC), sont similaires pour les deux sites (Tableau I). L'analyse de la granulométrie montre que la proportion moyenne de limon est comparable pour les deux sites (Tableau I). Par contre, le site Caza présente une proportion supérieure de sable (42,5%) comparativement au site Trépanier (31,1%) où la différence se traduit par

une plus grande proportion d'argile dans le sol (25,2% comparativement à 16,0% au site Caza) (Tableau I). Le sable, lorsque présent en grande quantité, a tendance à favoriser l'aération du sol, sa perméabilité et son réchauffement. L'argile, par son état colloïdal, est modelable; il peut donc absorber beaucoup d'eau en gonflant ou au contraire, se rétracter en séchant. L'argile, par son rôle prépondérant dans le pouvoir absorbant du sol, est un facteur pouvant expliquer la différence marquée de drainage du sol entre les deux sites (Tableau I). Ainsi, un déficit hydrique causé par des journées sèches successives, influencera davantage le site Caza que le site Trépanier.

### ***Dispositif expérimental, traitements et espèces plantées***

Le dispositif expérimental, installé au printemps de 2002, a été défini en vue d'analyser l'ambiance engendrée par la végétation en place et de comprendre ses effets sur la croissance et le développement de plants de feuillus établis au sein des traitements appliqués de façon identique sur deux sites. Au sein de friches arbustives à couvert continu, des ouvertures par bande ont été pratiquées par débroussaillage mécanisé.

La structure du dispositif comprend un plan d'expérience en trois blocs aléatoires complets. Trois différents types de traitements de débroussaillage par bande ont été désignés aléatoirement dans chaque bloc. Ainsi, trois blocs expérimentaux composent chacun des sites où se succèdent aléatoirement les trois différents traitements. Les neuf bandes créées sont orientées est-ouest de manière à obtenir un ensoleillement constant selon l'axe du soleil dans la journée (Lamprecht, 1989; Adjers *et al.* 1995). La coupe par bande fut effectuée, au mois de mai 2002, de manière mécanique à l'aide d'un tracteur forestier<sup>1</sup> muni de marteaux déchiqueteurs rotatifs (Fecon Bullhog®).

Deux des trois traitements procèdent par l'ouverture de bandes d'une largeur de 5m (avec interbande de 5m) alors que le troisième traitement est représenté par une largeur d'ouverture de bande de 3m (avec interbande de 7m). À partir de cette succession de bandes de végétation résiduelles et de bandes absentes de végétation caractérisant le nouveau milieu, deux approches ont été mises en place afin de conserver une végétation dans le voisinage des plants. Une première concerne le cas des bandes

<sup>1</sup> Il s'agit d'un tracteur hollandais de marque Valtra Valmet 8950, de 215 forces, équipé d'une tête Fecon Bullhog® d'une amplitude de près de 2,30m. Le site Trépanier a nécessité 5,25 heures de travail tandis que le site Caza fut complété en 3 heures.

ouvertes à 3m de largeur où les plants sont installés à l'intérieur de trouées de 1,5 mètre de diamètre pratiquées dans la marge des bandes résiduelles; ce traitement est nommé « trouée » (Tableau II). La seconde approche propose de reboiser les plants au centre de la bande débroussaillée. Avec l'objectif d'accentuer les effets de la végétation d'accompagnement en périphérie du plant, cette seconde approche fait l'objet de deux types de dégagement des plants. Un dégagement ciblé, où seule la cime du plant est maintenue libre de croître par l'ouverture d'un puits de lumière (traitement nommé « accompagné »), s'oppose à l'approche classique qui consiste à éliminer complètement la végétation concurrente présente dans l'environnement immédiat du plant (traitement nommé « dégagé »).

Le traitement « dégagé » (dega), consiste à éliminer complètement, en rabattant au sol, la végétation herbacée et ligneuse, dans un rayon 0,3m ou 0,6m centré sur le plant. Le traitement « accompagné » (acco), quant à lui, favorise le gainage du plant reboisé par la végétation concurrente. Dans ce cas, seule la cime vivante du plant est maintenue dégagée des compétiteurs. Dans les deux cas, l'intervention varie selon la hauteur du plant et celle de la végétation périphérique (Figure 2). La coupe des compétiteurs a été pratiquée à l'aide d'un taille-haie à essence (STIHL HS 80®). Dans ces deux traitements (acco et dega), les plants sont situés au centre de la bande ouverte, en quinconce, selon deux rangs distants de 1m et où l'espacement sur le rang est de 3m (Figure 3).

Le traitement « trouée » consiste à installer le plant dans une mini trouée circulaire de 1,5m de largeur pratiquée dans la bordure de la végétation des interbandes; les plants occupent donc le nord et le sud de la bande ouverte et sont donc soumis à différentes ambiances lumineuses (Figures 3 et 5). Ce traitement a été considéré comme induisant deux traitements distincts nommés trouée nord (trnd) et trouée sud (trsd) (Figure 4). Sur chacun des rangs nord et sud de ce traitement, les plants sont espacés de 3m (Figures 2 et 4).

La mise en terre des plants a été réalisée les 24 et 27 mai 2002 sur les sites Trépanier et Caza, respectivement. Les plants sont disposés sur les traitements par parcelle de 4 à 6 plants consécutifs selon une séquence aléatoire permettant une représentativité minimale d'une parcelle par espèce par rang (Figure 3). La densité reboisée est d'environ 650 tiges/ha pour chacun des traitements. L'effectif par bande (Tableaux III et IV) est relativement élevé pour renforcer l'analyse statistique. La séquence des

principales interventions réalisées, depuis la mise en place du dispositif, est présentée au Tableau V.

Au début de chaque saison de croissance, l'ouverture de corridors (sentier d'une largeur de 1m) par débroussaillage manuel, respectant l'interbande, a été réalisée directement au sud des bandes dégagées dans le cas des traitements « accompagné » et « dégagé » afin d'accéder facilement aux plants et de favoriser la pénétration de la lumière.

La plantation fut réalisée manuellement sur les deux sites à partir de plants d'arbres provenant de la pépinière de Berthier. L'érable à sucre (1+0<sup>2</sup>, en récipient), le noyer noir (1+0, racines nues), le chêne à gros fruits (2+0, racines nues) et le cerisier tardif (1+0, en récipient) ont été retenus de façon à analyser plusieurs espèces de haute valeur. Le choix de ces espèces est en accord avec leurs exigences écologiques. Ainsi, l'érable à sucre fut privilégié compte tenu de sa grande amplitude écologique (Godman *et al.* 1990; Cogliastro *et al.* 1997). Le noyer noir et le cerisier tardif, performants sur un sol riche présentant de bonnes conditions de drainage, furent également sélectionnés pour la plantation (Marquis, 1990; Williams, 1990). Finalement, le choix du chêne à gros fruits s'explique par son amplitude écologique modérée allant des sols argileux jusqu'aux loams sablonneux. Par contre, aux latitudes élevées, le chêne à gros fruits est toutefois limité aux dépôts à drainage modéré et aux sols contenant une proportion d'argile appréciable (Johnson, 1990).

Il est à noter qu'un regarni ponctuel a eu lieu au printemps 2003 afin de maintenir un effectif constant au cours du temps. Ces plants d'arbres ont clairement été identifiés sur le terrain et sont exclus des analyses afin de comparer seulement la population d'origine (plantation de 2002).

## ***Échantillonnage***

### ***Choix des arbres échantillons de l'effectif expérimental***

La sélection des arbres échantillons a été effectuée parmi les plants sains, dans les jours suivants la plantation avant que tout effet traitement soit observé. Un groupe de

---

<sup>2</sup> Le premier chiffre désigne le nombre d'année(s) d'ensemencement du plant et le deuxième chiffre désigne le nombre d'année(s) de croissance du plant suite à un repiquage. La somme de ces deux chiffres donne l'âge total du plant.

variables réponses (hauteur totale de l'arbre, diamètre au collet de l'arbre, longueur de la pousse annuelle, largeur moyenne de la cime de l'arbre, indice de vitalité basé sur la fluorescence chlorophyllienne) et environnementales (lumière disponible selon quatre mesures de hauteur, humidité du sol, hauteur moyenne de la compétition ligneuse, distance moyenne de la compétition ligneuse et recouvrement total de la compétition ligneuse et herbacée) a été échantillonné sur cet effectif expérimental sélectionné. Pour l'ensemble des variables mentionnées ci-bas, à l'exception des relevés de végétation effectués en 2002, l'effectif est présenté par espèce, par traitement et par site au Tableau V.

#### *Conditions des sols*

Au printemps 2003, des échantillons de sol ont été prélevés systématiquement sur chacun des sites pour effectuer une analyse de la texture des sols (Bouyoucos, 1962). L'effectif comprend, pour les sites Caza et Trépanier, 3 et 5 échantillons par rang respectivement. Chacun des échantillons fut prélevé dans l'horizon B, à une profondeur située entre 27,5 et 32,5 cm dans le sol minéral. Une deuxième série d'échantillons, prélevée dans l'horizon A, à une profondeur située entre 12,5 et 17,5 cm dans le sol minéral, a été utilisée pour l'analyse du pH du sol à l'aide d'un pH-mètre à électrode de verre (solution 2:1 d'eau et de sol). Ces échantillons par rang (3 ou 5) ont été homogénéisés en un seul échantillon qui fut séché à l'air et passé au tamis de 2,0 mm préalablement aux analyses chimiques. Les analyses des éléments nutritifs du sol (K, Mg, Ca, Al, N et P et la capacité d'échange cationique (CEC)) ont été confiées au laboratoire accrédité *Agridirect inc (Longueuil, Qc, Canada)*.

#### *Variable environnementale – La lumière*

La prise de données de lumière a été effectuée à la seconde année de croissance des plants (2003) en utilisant une sonde linéaire appelée *Line Quantum Sensor (LICOR, Li-191SA, Lincoln, NE, USA)*. Cet instrument permet l'intégration, sur une distance fixe de 1 mètre, de la radiation photosynthétiquement active (RPA) transmise sous couvert qui pénètre jusqu'aux plants. Ainsi, cet appareil est l'un des plus appropriés pour rendre compte de la grande variabilité des conditions de lumière existantes sous couvert partiel (Ter-Mikaelian *et al.* 1999). Les conditions optimales permettant l'utilisation de cet appareil se limitent exclusivement aux journées ensoleillées, sans apparence d'une couverture nuageuse, où l'ombre au sol doit être visible. La plage d'échantillonnage s'est limitée aux conditions de lumière directe soit entre 10 :30 et 14 :30. L'acquisition des



données fut effectuée durant la première moitié du mois de juillet 2003 soit pendant la saison de pleine feuillaison. Une sonde unique (*LICOR, Li-190SA Lincoln, NE, USA*), disposée cette fois dans un endroit dénudé de couverture végétale et à proximité du lieu d'échantillonnage, complète l'ensemble des instruments d'échantillonnage. Cette dernière a servi de valeur de référence dans le calcul des ratios de densité du flux de photons photosynthétiques disponibles pour les plants reboisés (%DFPP). Le calibrage des sondes, par une transformation des données, a été nécessaire suite aux résultats de la régression linéaire simple ( $R^2=0,999$ ).

$$\text{DFPP (\%)} = \frac{\text{RPA transmise sous couvert partiel de végétation}}{\text{RPA transmise en absence de végétation}} \times 100$$

La sonde de lecture fut orientée systématiquement dans le sens du rang d'arbre soit dans l'axe est-ouest. La prise de données fut effectuée à trois hauteurs différentes, centrées sur la flèche terminale des plants d'arbres reboisés. Une première lecture, située directement au sommet de la cime vivante, permet l'évaluation de la ressource lumineuse disponible pour chacun des plants considérant leur hauteur. Une seconde lecture située à une hauteur fixe de 50 centimètres du sol permet l'évaluation de l'effet du traitement sur la quantité de RPA atteignant la végétation basse. Dans le cas où la hauteur du plant d'arbre reboisé était supérieure à 50 centimètres, une première mesure intégrait l'ombre générée par l'arbre, alors considérée comme partie intégrante de l'effet du traitement et, une seconde mesure l'excluait en écartant la cime de l'arbre pour supprimer son effet. Une dernière lecture a été réalisée à une hauteur fixe de 1,5 mètre afin de compléter l'évaluation du gradient vertical de lumière dans chaque traitement. Une seule mesure par point d'échantillonnage était réalisée et elle était synchronisée avec celle obtenue à l'extérieur du site, en milieu ouvert, par un lien radio entre les deux opérateurs.

#### *Variable environnementale - La végétation à la périphérie des plants*

La végétation ligneuse en reprise a été échantillonnée en août 2002, soit deux mois après les travaux de plantation, selon la méthode du relevé de Braun-Blanquet afin de pouvoir décrire chacun des sites. L'identification, le recouvrement par classes (1-5%, 6-15%, 16-25%, 26-50%, 51-75% et 76-100%) et le dénombrement (espèces ligneuses seulement) de toutes les espèces ayant un recouvrement de plus de 1% au sein d'un quadrat de 1m<sup>2</sup>, positionné avec un plant d'arbre en son centre, ont été réalisés.

L'effectif est de sept parcelles par rang par site pour un total de 124 parcelles échantillons (sept parcelles × neuf rangs × deux sites).

La nature et l'importance de la végétation d'accompagnement au sein des traitements ont été l'objet d'une approche d'analyse particulière. L'identification à l'espèce, la mesure de la hauteur et de la distance minimale entre le compétiteur (espèce ligneuse seulement) le plus proche et la base du tronc du plant reboisé furent notées pour quatre quadrants centrés sur le plant reboisé (Figure 6). Une hauteur moyenne et une distance minimale moyenne de la végétation d'accompagnement ont été calculées à partir des valeurs des quatre quadrants. La récolte des données a été réalisée en juillet 2003 soit de trois à quatre semaines suivant les travaux de dégagement des plants. De plus, le recouvrement total en espèces herbacées et ligneuses, par classes de 10%, ont été mesurés dans un quadrat de 1m<sup>2</sup> centré sur le plant. Ces données de recouvrement ont été échantillonnées près de huit semaines suivant les travaux de dégagement des plants.

Plusieurs indices de compétition ont été développés pour estimer le niveau de compétition en périphérie d'un plant d'arbre (Brand, 1986; Wagner et Radosevich, 1987; 1991; 1998). Parmi ceux-ci, nous avons retenu l'indice de compétition proposé par Brand (1986) qui permet de prédire la vigueur d'arbres plantés en fonction de l'intensité de l'accompagnement. L'indice de Brand (1986), développé à partir de plants d'arbres résineux, a été modifié afin de tenir compte de la différence morphologique avec des arbres feuillus. L'indice de l'importance de la végétation d'accompagnement retenu fut calculé à partir des données de compétition et de croissance recueillies.

$$\text{Indice de l'importance de la végétation d'accompagnement} = \left( \frac{H_{\text{comp}}}{H_t} \right) \times 100 \times \text{proximité}$$

Où *H<sub>comp</sub>* représente la hauteur moyenne de la compétition ligneuse, *H<sub>t</sub>* correspond à la hauteur totale de l'arbre et *proximité* égale 1 - distance moyenne de la compétition ligneuse comprise dans un rayon de 0,6m, ce qui représente la hauteur moyenne, toutes espèces confondues, des plants reboisés en 2002.

*Variable environnementale – L'humidité du sol*

L'humidité du sol a été mesurée deux fois (14 et 18 août) au cours de l'été 2003. La lecture du pourcentage d'humidité du sol en % par volume a été effectuée à l'aide de la sonde d'humidité TDR (*Delta-T Devices, ThetaProbe type ML2x, Burwell, Cambridge, UK*). Les deux mesures ont été prises respectivement à 3 et 7 jours suivant une averse importante (le 11 août 2003) sur les deux sites. Deux mesures successives, échantillonnées à 5 centimètres au sud du collet du plant, ont été prises dans les 10 premiers centimètres de sol minéral. La moyenne de ces deux valeurs fut calculée et retenue afin de tenir compte de la variation possible entre les mesures (de l'ordre de 0,4%).

*Variable réponse - La croissance*

Un premier échantillonnage fut réalisé suite à la plantation afin de connaître spécifiquement le diamètre au collet et la hauteur totale des arbres de l'effectif au moment initial soit dans la première semaine de juin 2002. L'analyse de ces deux variables a permis de valider l'absence de variabilité spatiale de départ. Par la suite, les mesures de la hauteur de l'arbre, du diamètre au collet, de la longueur de la pousse annuelle, de la largeur moyenne de la cime de l'arbre (deux mesures : une selon un axe parallèle au rang et l'autre selon un axe perpendiculaire au rang) et de la survie ont été prises, suite à la saison de croissance, au milieu du mois de septembre en 2002 et 2003.

Un vernier électronique (précision au centième de millimètre) fut utilisé pour déterminer le diamètre au collet des arbres et une règle graduée (précision au millimètre) fut employée pour les mesures de la hauteur de l'arbre, de la longueur de la pousse annuelle et de la largeur de la cime de l'arbre. Afin d'assurer une prise de mesures systématique, le diamètre au collet et la largeur de la cime ont été mesurés selon un axe parallèle au rang. De plus, un examen visuel a été réalisé afin de noter la présence de broutage. Des variables composites ont été calculées à partir de ces données. Toutefois, à la lumière des analyses statistiques exploratoires, une seule variable relative a été retenue, soit le rapport hauteur totale/diamètre au collet moyen des plants de l'été 2003.

### *Variable réponse - La fluorescence*

La mesure du taux de fluorescence chlorophyllienne permet d'évaluer la tolérance de l'appareil photosynthétique d'une plante contrainte à un stress environnemental (Schreiber *et al.* 1994; Méthy *et al.* 1997). Il existe plusieurs indices qui permettent l'évaluation de la vigueur d'un plant sur la base de la fluorescence<sup>3</sup>. Le choix de l'indice de vitalité global retenu se justifie à la fois par sa très nette représentativité de l'état de santé global du plant et par sa faible variabilité face à la durée de la modulation (Percivals et Sheriffs, 2002; Meinander *et al.* 1996). De plus, cette approche non destructrice permet un échantillonnage rapide, efficace et facilement réalisable sur le terrain (Bazile *et al.* 2002).

$$\text{Indice de vitalité} = \frac{F_v}{F_m} = \frac{(F_m - F_o)}{F_m}$$

Où  $F_o$  représente le niveau normal de fluorescence sans stress,  $F_m$  correspond à la fluorescence maximale en conditions de lumière saturante et finalement,  $F_v$  symbolise l'accroissement initial de la fluorescence suite à une première excitation saturante.

Lorsque soumise à un stress, le plant aura un rapport  $F_v/F_m$  moins élevé qu'un plant non stressé car le  $F_o$  du plant augmente. Cette augmentation de  $F_o$  est caractéristique d'une plus faible abondance des centres réactionnels du photosystème II, ce qui se traduit par une augmentation de la fluorescence (Schiefthaler *et al.* 1999). Pour des feuilles d'arbres décidus, le rapport  $F_v/F_m$  moyen correspond à des valeurs comprises entre 0,831 et 0,853 (Björkman et Demmig, 1987).

La prise de données de fluorescence a été effectuée à la seconde année de croissance des espèces en plantations (2003) à l'aide d'un fluoromètre (*Opti-Sciences, Chlorophyll Fluorometer OS-30, Tyngsboro, MA, USA*). Cet instrument permet l'enregistrement de plusieurs données de fluorescence correspondant à des moments d'excitation différents. Un flash saturant, de modulation variable, est intégré à l'appareil de capture des

---

<sup>3</sup> Lorsque la chlorophylle absorbe de la lumière, les électrons sont temporairement excités à un niveau supérieur d'énergie. Lors du retour à un niveau inférieur d'énergie, il peut se produire trois phénomènes : 1- L'énergie est dissipée sous forme de chaleur. 2- L'énergie peut être retransmise en lumière de plus grande

données afin de permettre l'excitation des feuilles sous contrainte de noirceur absolue. Au sein de la cime vivante de chacun des arbres-échantillons, une feuille entière, saine et en position subterminale fut sélectionnée. Sur chaque feuille, une superficie de  $1\text{cm}^2$  fut adaptée à la noirceur totale pendant 30 minutes (Percivals et Sheriffs, 2002) à l'aide de pinces spéciales pouvant recevoir la source de lumière saturante après la période de mise en noirceur. La durée de modulation a été fixée à 2 secondes soit la période minimale permise par l'appareil car les variables  $F_o$  et  $F_m$  sont obtenues dès le premier flash de saturation. De plus, la plage d'échantillonnage s'est limitée entre 07 :00 et 10 :30 afin d'éviter la fermeture possible des stomates au milieu de la journée. L'acquisition des données fut effectuée durant la première moitié du mois d'août 2003; soit pendant la saison de pleine feuillaison (Kiato *et al.* 1998).

### **Méthodes d'analyses statistiques**

Une première série d'analyses de variance (ANOVA), visant à évaluer l'effet des traitements sur l'ensemble des variables biotiques, a été conduite avec le logiciel SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) pour chacune des quatre espèces. Les analyses ont été réalisées séparément pour les deux sites en considérant les sources de variation suivantes : trois blocs (1, 2 et 3), quatre traitements (acco, dega, trnd et trsd) et quatre espèces (chêne à gros fruits (chg), cerisier tardif (cet), érable à sucre (ers) et noyer noir (non)) pour un total de 48 interactions possibles par site. Parallèlement, une deuxième série d'analyses de variance (ANOVA), visant cette fois à évaluer l'effet des traitements sur l'ensemble des variables abiotiques, a été conduite. Les analyses ont été réalisées séparément pour les deux sites en considérant les sources de variation suivantes : trois blocs et quatre traitements (acco, dega, trnd et trsd) pour un total de 12 interactions possibles par site. Le seuil de signification pour les analyses de variance a été fixé à  $p \leq 0,05$ . De plus, le test de comparaison multiple des moyennes de Tukey a été appliqué pour préciser les effets significatifs.

Une dernière série d'analyses, effectuée avec l'aide de tests multivariés, a permis de confronter simultanément les variables biotiques aux variables environnementales. L'analyse canonique de redondance polynomiale (RDAP) fut privilégiée car cette approche permet de modéliser des relations non-linéaires entre les variables

---

longueur d'onde, c'est ce qu'on appelle la fluorescence. 3- L'énergie est captée pour la formation d'un lien chimique; la photosynthèse.

(Makarenkov et Legendre, 1999). Cette méthode est basée sur un algorithme empirique de régression qui permet de chercher la forme des relations polynomiales entre les variables biotiques et abiotiques ainsi que de prendre en compte les interrelations entre les variables explicatives (Makarenkov et Legendre, 2002).

La normalité de la distribution a été vérifiée sur l'ensemble des variables considérées. Parallèlement, les variables réponses ont été confrontées aux variables environnementales à l'aide du diagramme de dispersion afin d'examiner l'apparence des relations. Les différentes variables ont été centrées et réduites afin de présenter un jeu de données de dimension homogène. Lors d'une première analyse, les variables environnementales ont été soumises à des tests par permutation de Monte Carlo (999 permutations) par sélection progressive afin de retenir seulement celles qui présentaient des valeurs de probabilité jugées statistiquement intéressantes ( $p \leq 0,10$ ). Ainsi, six variables environnementales, sur une possibilité de dix, ont été retenues conformément aux explications précédentes.

Par ailleurs, Une analyse factorielle des correspondances (AFC) a été effectuée à partir des données de recouvrement par espèce afin de décrire la communauté végétale d'origine. Les valeurs de la matrice utilisée pour l'AFC sont les centroïdes des bornes de chacune des classes de recouvrement. De plus, une analyse de tableau de fréquence utilisant un modèle log-linéaire, par site, a permis de vérifier l'effet des traitements sur l'indice de compétition calculé pour chaque arbre échantillon. Une analyse du même type a permis de vérifier l'effet des traitements et des espèces sur la mortalité des plants survenue en 2002, en 2003 et conjointement pour deux années de croissance.

## Résultats et discussion

### ***Caractéristiques de la végétation ligneuse en reprise***

L'objectif poursuivi par l'analyse factorielle des correspondances (AFC), présentée à la Figure 7, consiste à caractériser les sites selon la végétation ligneuse en reprise. L'examen du diagramme de double projection de la première AFC (non-présenté) a permis d'exclure deux espèces fortement associées à l'un ou l'autre des deux sites, le *Cornus stolonifera* (CCST) et le *Fraxinus pennsylvanica* (BFPE), qui augmentaient considérablement l'inertie totale du modèle et diminuaient l'interprétation des résultats. L'inertie totale de l'AFC finale est de 2,038, expliquée à 46,4% par les deux premiers axes (0,474 et 0,427 respectivement). Les deux vecteurs représentant les sites ont été multipliés par un facteur de deux sur l'ordination afin de permettre une meilleure représentation graphique (Figure 7).

### ***Espèces ligneuses communes aux deux sites***

Plusieurs espèces ligneuses telles *Acer negundo* (BANE), *Rhamnus catharticus* (URCA), *Crataegus* sp. (CCSP) et *Zanthoxylum americanum* (CZAM) ne semblent pas associées à un site en particulier (Figure 7). En effet, ces espèces arbustives, reconnues comme invasives dans le sud du Québec (Meilleur *et al.* 1994), sont présentes à la fois chez Caza et Trépanier, deux sites issus de l'abandon agricole. Pour ce qui est de *Prunus pensylvanica* (BPPE), *Acer rubrum* (BARU), *Acer saccharum* (AASA) et *Juglans cinerea* (BJCI), ces espèces se retrouvent sur les deux sites à la fois à l'état de semis en reprise et de gaules au sein de la strate arbustive en périphérie des ouvertures pratiquées au sein des traitements trouées.

### ***Espèces ligneuses propres au site Caza***

Le site Caza renferme quelques espèces ligneuses distinctives. C'est le cas notamment du frêne de Pennsylvanie, clairement associé à ce site et supprimé de l'AFC présentée. De plus, *Ulmus americana* (AUAM), *Malus* sp. (UMSP), *Thuja occidentalis* (BTOC) et *Prunus serotina* (BPSE) sont des espèces ligneuses essentiellement retrouvées sur ce site (Figure 7). La présence du thuya occidental peut possiblement s'expliquer par l'historique de ce site. En effet, cette espèce d'arbre semble résister au broutage répété lors d'activités de pâturage (de Blois et Bouchard, 1995). Pour ce qui est de l'orme

d'Amérique et du cerisier tardif, leur existence est intimement reliée à la présence à proximité de quelques arbres matures. Par contre, la densité des semis est insuffisante pour assurer une régénération naturelle adéquate.

#### *Espèces ligneuses propres au site Trépanier*

Le site Trépanier se distingue par la présence de quelques espèces ligneuses. C'est le cas notamment du cornouiller stolonifère, supprimé de l'AFC suite à une première analyse. De plus, *Populus tremuloides* (BPTR), *Fraxinus americana* (AFAM), *Rhus typhina* (CRTY) et *Cornus obliqua* (GCOB) forment le cortège végétal propre au site Trépanier (Figure 7). Pour ce qui est du vinaigrier et du cornouiller oblique, ces deux espèces arbustives peuvent être invasives dans le sud du Québec (Meilleur *et al.* 1994).

### **Étude des variables environnementales**

#### *Densité du flux de photons photosynthétiques disponibles (%DFPP)*

Sur les deux sites et pour l'ensemble des traitements, la ressource lumineuse disponible à 50cm du sol (%DFPP à 50cm) s'est maintenue entre 2002 et 2003 (Figure 8). Nous pouvons conclure que les travaux de dégagement des plants, réalisés quatre semaines avant la prise de lecture des données de lumière, ont été réalisés dans le respect de la prescription sylvicole.

L'environnement lumineux diffère significativement selon les traitements et ce, pour les deux sites ( $p \leq 0,001$  pour les quatre mesures sur les deux sites) (Figure 9). Les traitements dégagé (dega) et accompagné (acco) se distinguent des traitements trouées nord (trnd) et sud (trsd) par une disponibilité supérieure en %DFPP indépendamment de la hauteur de la prise de mesure et ce, sur les deux sites (Figure 9). Il existe une similitude entre les valeurs mesurées à 50cm du sol et à hauteur de la cime car la hauteur moyenne des plants, toutes essences confondues, est proche de 50cm (Tableau IX). Finalement, pour une hauteur donnée, le site Caza offre une moyenne de %DFPP supérieure à celle mesurée au site Trépanier (Figure 9).

Les arbustaies constituent un milieu hétérogène où de nombreuses trouées, aux dimensions variables mais généralement petites, influencent le pourcentage de luminosité disponible tant au sol que directement sous la canopée. L'hétérogénéité spatiale des conditions lumineuses des arbustaies est associée à la variation, d'un



microsite à l'autre, de la vitesse de colonisation par les végétaux suite à l'abandon de l'activité agricole. Ces phénomènes peuvent être responsables de la variabilité de l'environnement lumineux à l'intérieur des dispositifs et au sein même d'un traitement (Figure 9).

#### *Importance de la végétation d'accompagnement en périphérie des plants*

La végétation d'accompagnement en périphérie des plants a été quantifiée selon deux analyses distinctes. La première intègre la hauteur moyenne et la distance moyenne de la végétation d'accompagnement et la hauteur totale du plant dans un indice d'importance de la végétation d'accompagnement tandis que la seconde est basée sur le recouvrement moyen en espèces herbacées et ligneuses, évalué dans un quadrat d'un mètre carré centré sur le plant d'arbre.

Rappelons que le dégagement des plants des traitements accompagné et trouées nord et sud a été effectué selon deux possibilités de rayon d'ouverture en périphérie du plant (30 ou 60cm) (Figure 2); le traitement dégagé a été systématiquement réalisée sur 60cm de rayon autour du plant. Dans la majorité des cas, la hauteur de la végétation d'accompagnement était plus de deux fois supérieure à celle du plant alors il n'est pas surprenant d'observer des valeurs de distance moyenne se rapprochant de 60cm (non-présenté).

La hauteur moyenne de la compétition ligneuse présente dans un rayon de 60cm des plants est significativement supérieure dans les traitements trouées nord et sud, et ce sur les deux sites Caza ( $p=0,0002$ ) et Trépanier ( $p=0,0001$ ) (Figure 10). De plus, sur le site Trépanier, le traitement accompagné se distingue du traitement dégagé par une valeur de hauteur moyenne légèrement inférieure (Figure 10).

Au début juillet 2003, sur les deux sites, la hauteur moyenne de la végétation d'accompagnement des traitements dégagé et accompagné était de 40% à 50% inférieure aux traitements trouées nord et sud où la végétation périphérique atteignait près de 1,50 mètre (Figure 10). Cette différence s'explique par la nature du traitement par mini trouées. En plus des espèces ligneuses en reprise suite au dégagement effectué en début de la saison de croissance, les traitements trouées nord et sud comprennent un recouvrement de branches provenant de la végétation située en périphérie de la trouée et qui occupent le haut du puit de lumière.

L'analyse du tableau de fréquence (Tableau VI), qui répartit l'indice de l'importance de la végétation d'accompagnement de chaque plant d'arbre selon quatre classes, révèle que les traitements présentent des différences significatives sur les deux sites, Caza ( $p(\chi^2)=0,007$ ) et Trépanier ( $p(\chi^2)=0,004$ ). Sur les deux sites, le traitement accompagné se démarque des trois autres traitements par une proportion supérieure de plants entourés d'une forte présence de la végétation d'accompagnement. De plus, sur le site Trépanier, on observe un gradient de compétition ligneuse d'un traitement à l'autre. Ainsi, le traitement dégagé présente la plus grande proportion de plants affectés par une faible compétition ligneuse, alors que les plants des traitements trouées nord et sud sont généralement en situation intermédiaire d'accompagnement en comparaison aux autres traitements.

La deuxième analyse de la végétation d'accompagnement a été réalisée près de quatre semaines suivant la première. Cette fois, le recouvrement moyen en espèces herbacées et ligneuses a été évalué dans un quadrat d'un mètre carré centré sur le plant d'arbre.

Le recouvrement moyen en espèces herbacées diffère significativement ( $p=0,02$ ) entre les traitements sur le site Trépanier où la valeur de recouvrement est inférieure dans le traitement dégagé (Tableau VII). De plus, environ deux mois après le dégagement total en périphérie des plants, le recouvrement moyen en espèces herbacées au sein du traitement n'est que de 16,9%, soit 10% de moins que le traitement accompagné et près de 22% de moins que les traitements trouées nord et sud (Tableau VII). Sur le site Caza, les traitements ne sont pas différenciés selon l'importance de la végétation herbacée présente (Tableau VII). Contrairement aux résultats obtenus par Kolb *et al.* (1990) et Fournier (2003), il n'existe pas de réduction significative de l'importance des herbacées dans l'environnement le plus ombragé sous un régime de lumière très hétérogène sur les deux sites. En effet, malgré une disponibilité réduite en %DFPP (Figure 9), le recouvrement moyen en espèces herbacées des traitements trouées nord et sud est égal ou supérieur à celui des traitements dégagé et accompagné (Tableau VII). Plusieurs espèces herbacées ou arbustives couvre-sol telles *Parthenocissus quinquefolia*, *Vitis riparia*, *Fragaria virginiana*, *Viola* spp. et *Solidago flexicaulis* semblent bien adaptées à la strate inférieure des communautés végétales formant les interbandes des traitements trouées des deux sites.

Le recouvrement moyen en espèces ligneuses diffère significativement ( $p \leq 0,01$ ) entre les traitements sur le site Caza (Tableau VII). Le traitement dégagé se démarque du traitement accompagné par une valeur de recouvrement inférieure; les traitements trouée sud et nord affichant une valeur médiane (Tableau VII). Finalement, notons que le recouvrement moyen en espèces herbacées sur le site Caza (51,8%) est supérieur à celui obtenu sur le site Trépanier (31,0%) (Tableau VII). Cet écart peut s'expliquer par les différences observées dans les conditions de lumière qui prévalent sur ces deux sites (Figures 8 et 9).

À la lumière des résultats, plusieurs constats se dégagent. Tel qu'attendu, le traitement dégagé induit l'intensité d'accompagnement la plus faible peu importe la variable observée et ce, sur les deux sites. Toutefois, sur le site Caza, les traitements trouées sud et nord s'apparentent au traitement dégagé pour ce qui est de l'indice de l'importance de la végétation d'accompagnement. En effet, comme l'humidité moyenne du sol du site Caza est inférieure à celle du site Trépanier, la vigueur de la végétation en reprise est moins forte. De plus, suite au dégagement des plants effectué au printemps, cette reprise est limitée par la faible disponibilité de la lumière présente au sein des trouées. Pour ce qui est du site Trépanier, la reprise de la végétation d'accompagnement est marquée, spécialement au sein du traitement accompagné où la quantité de lumière disponible est importante. Enfin, sur le site Caza, seul le traitement accompagné se démarque des autres traitements au niveau de l'indice de l'importance de la végétation d'accompagnement, probablement en raison d'un recouvrement moyen en espèces ligneuses élevé, ce qui augmente les chances que des rejets de tiges, suite à l'activité de dégagement, occupent l'environnement immédiat du plant.

#### *Humidité du sol*

L'humidité du sol ne diffère pas significativement entre les traitements pour le site Caza (Figure 11). Pour ce qui est du site Trépanier, le traitement dégagé diffère significativement ( $p=0,05$ ) du traitement trouée nord par une valeur d'humidité supérieure; les traitements accompagné et trouée sud affichant une valeur médiane (Figure 11). Toutefois, comme le modèle de l'analyse de variance présente une faible valeur de  $R^2$  (0,12) et que l'ampleur des différences est assez minime, nous considérons que le contenu en eau du sol demeure assez semblable entre les traitements.

Les deux sites sont différenciés en terme de contenu en eau du sol (Figure 11). Les valeurs moyennes obtenues sur le site Caza sont dans l'ensemble 12,6% et 16,6% inférieures à celles mesurées sur le site Trépanier après respectivement trois et sept jours suivant une averse. L'écart entre ces valeurs peut s'expliquer par les différences observées au niveau du drainage et de la classe texturale dominante des sols des deux sites qui avantage la rétention du contenu en eau du site Trépanier et ce malgré une végétation en place plus importante (Tableau I). On peut alors penser qu'à l'été 2002, un déficit hydrique important, causé par l'absence de pluie prolongé pendant quelques semaines et confirmé par la présence de fendillement à la surface du sol des deux sites (particulièrement chez Trépanier où l'argile est présente en plus grande proportion dans le sol), a induit des conditions de croissance difficiles notamment chez l'érable à sucre (Tableau VIII).

De plus, en l'absence d'autres contraintes, la croissance augmente normalement avec l'augmentation de la ressource lumineuse disponible (Kozlowski *et al.* 1991). Par contre, lorsque des arbres se développent dans un environnement lumineux relativement homogène, leurs différences de croissance sont généralement imputables à la compétition pour l'eau et les nutriments nutritifs du sol (Löf, 2000). Ainsi, règle générale, le site Caza dispose d'une plus faible humidité dans le sol que le site Trépanier (Figure 11) en raison de sa plus grande disponibilité en %DFPP (Figure 9) qui influence directement la vitesse d'évaporation de l'eau dans le sol.

### ***Étude de la croissance des jeunes plants d'arbres***

#### ***Bilan de survie***

La survie, après deux saisons de croissance, est très satisfaisante sur les sites Caza (82,1%) et Trépanier (91,2%) (Tableau VIII) compte tenu de l'été sec de 2002 et de la période sèche prolongée survenue au cours de l'été 2003. Durant cette période, la majorité (69,8% et 92,1% respectivement sur les sites Caza et Trépanier) de la mortalité observée, toutes espèces d'arbres confondues, est survenue lors de la première année de croissance des plants (2002) (Tableau VIII et Figure 12).

Une analyse de tableau de fréquence a permis d'analyser la mortalité de 2002, de 2003 et du bilan cumulatif de 2002-2003 en fonction des traitements et des espèces sur chaque site. Les traitements n'ont pas induit de différences significatives de mortalité sur

chaque site pour l'une ou l'autre des périodes et des espèces (non-présenté). Par contre, les taux de mortalité de la première saison de croissance et ceux du bilan cumulatif de 2002-2003 diffèrent entre les espèces (Figure 12). Comme l'effet de l'espèce sur la mortalité de 2002 explique en grande partie celui sur la mortalité du bilan cumulatif de 2002-2003, l'analyse ne portera que pour l'ensemble des deux années de croissance des plants.

Sur le site Caza, la survie du cerisier tardif fut supérieure aux trois autres espèces d'arbres (Figure 12) en raison de sa tolérance aux différents régimes hydriques et types de sol (Marquis, 1990), en particulier les sols loam sablonneux (Ritchie, 1996), tel que retrouvés sur le site Caza (Tableau I). La survie du chêne à gros fruits et celle du noyer noir se classent au deuxième rang tandis que l'érable à sucre présente le taux de mortalité le plus élevé, principalement en raison de la mortalité survenue en 2002 (Figure 12).

Sur le site Trépanier, la survie du noyer noir fut supérieure aux trois autres espèces d'arbres (Figure 12) en raison de sa préférence pour les sols riches, frais et fertiles (William, 1990), tels les loam argileux que l'on retrouve sur ce site (Tableau I). Toujours sur ce site, la survie du cerisier tardif se classe troisième, suivant une mortalité, non expliquée, survenue principalement à la première année.

Par ailleurs, la survie de l'érable à sucre en 2002, de 70,7% sur le site Caza et 88,5% sur le site Trépanier, a notamment été plus faible que les autres espèces (Tableau VIII). L'explication de ce résultat est probablement relié au type de plants reboisés en relation avec l'été sec observé en 2002. En effet, il a été rapporté par plusieurs intervenants que, au sein de la région de la Montérégie, le succès de reboisement des plants en récipients d'érable à sucre, âgés seulement d'une année de croissance, a été particulièrement faible suite au déficit hydrique survenu au cours de l'été. De plus, cet écart de 17,8%, observée chez la survie de l'érable à sucre entre les deux sites peut être associé à la texture plus grossière du sol du site Caza (Tableau I) et à son influence sur le pouvoir de rétention d'eau.

Finalement, pour ce qui est de la protection contre le broutage du cerf de Virginie (*Odocoileus virginianus*), le traitement répulsif appliqué tôt au printemps et à l'automne (Tableau IV) a permis de limiter les réductions de cime à une dizaine de plants d'arbres

sur chacun des sites pour les deux saisons de croissance. Ce nombre représente 1,4% de l'effectif total des sites Caza et Trépanier, ce qui est négligeable. L'efficacité du répulsif utilisé et la présence d'un couvert arbustif résiduel important semblent une combinaison gagnante permettant d'assurer le maintien de l'effectif initial. De plus, l'examen du diamètre au collet des plants n'a pas relevé la présence de dégâts causés par les rongeurs.

#### *Effets des traitements sur la croissance des arbres plantés*

À l'image des résultats obtenus en 2002, la hauteur totale complétée en 2003 par les plants d'arbres des quatre espèces à l'étude ne diffère pas significativement entre les traitements sur les deux sites (Tableau IX). Par ailleurs, notons que pour toutes essences et tous traitements confondus, la hauteur totale des plants en 2003 est supérieure sur le site Trépanier comparativement au site Caza (Tableau IX). Sur le site Trépanier, toutes les espèces se sont accrues en hauteur de 2002 à 2003 alors que sur le site Caza, certains reculs de croissance sont constatés chez le chêne à gros fruits et particulièrement chez l'érable à sucre dans tous les traitements (Tableau IX). L'avortement du bourgeon terminal de l'axe principal au cours de la saison de croissance, causé possiblement par un déficit hydrique particulièrement marqué sur le site Caza en comparaison du site Trépanier, pourrait expliquer cette diminution de la hauteur totale en 2003 chez ces espèces.

Pour un même site, le diamètre au collet en 2003 est supérieur à celui de 2002 pour tous les espèces d'arbres à l'étude (Tableau X). Sur le site Caza, seul le diamètre au collet de 2002 de l'érable à sucre diffère significativement selon les traitements (Tableau X). Cette différence n'est cependant plus mesurée en 2003 (Tableau X). Sur le site Trépanier, on observe une forte tendance non différenciée significativement pour ce qui est du diamètre au collet de l'érable à sucre en 2002. Toujours sur le site Trépanier, le diamètre au collet des plants d'arbres du cerisier tardif et du noyer noir diffère significativement ( $p=0,03$  pour le cerisier tardif en 2003 et  $p=0,01$  pour le noyer noir aux deux années) selon les traitements. Pour ces deux espèces en 2003, un gradient de valeur de diamètre est observable entre les traitements où le traitement dégagé se démarque du traitement trouée sud par une valeur moyenne supérieure du diamètre au collet; les traitements accompagné et trouée nord affichant une valeur médiane. À la lumière des résultats, on peut penser qu'une plus grande disponibilité de la ressource lumineuse

favorise l'accroissement du diamètre au collet des plants de cerisier tardif et du noyer noir sur ce site.

La longueur moyenne de la pousse terminale des plants ne diffère pas entre les traitements et ce, pour les deux sites (Figure 13). Par contre, la longueur moyenne de la pousse terminale des plants, pour toutes les espèces d'arbres, est supérieure sur le site Trépanier ( $\pm 13\text{cm}$ ) comparativement au site Caza ( $\pm 7\text{cm}$ ) (Figure 13). Cette différence peut probablement s'expliquer par les différents niveaux de disponibilité en eau du sol des deux sites.

Le rapport hauteur totale/diamètre au collet (H/D) moyen des quatre espèces d'arbres ne diffère pas selon les traitements sur le site Caza comme dans le cas du chêne à gros fruits sur le site Trépanier (Figure 14). Sur ce site, le rapport H/D moyen diffère significativement entre les traitements chez le cerisier tardif, le noyer noir et l'érable à sucre ( $p=0,02$ ,  $p=0,04$  et  $p=0,08$  respectivement). Chez le cerisier tardif et le noyer noir, le traitement dégagé produit un rapport H/D moyen inférieur au traitement trouée sud tandis que les traitements accompagné et trouée nord affichent une valeur médiane (Figure 14). Chez l'érable à sucre, les traitements dégagé et accompagné se démarquent du traitement trouée nord par une valeur inférieure de rapport H/D moyen tandis que le traitement trouée sud affiche une valeur médiane (Figure 14). Ce phénomène d'élancement du plant, en relation avec les traitements, est particulièrement intéressant car une modification morphologique du plant témoignerait d'une adaptation face à un environnement (niveau d'accompagnement) différent. Gavaland et Gauvin (1997) ont aussi observé une relation directe entre le rapport H/D de plants de merisier (*Prunus avium*) et la densité de la végétation d'accompagnement dans un contexte de plantation sur terres agricoles. Toutefois, ces auteurs émettent des réserves quant à l'augmentation possible des risques d'instabilité des arbres lorsque soumis à ces conditions durant une période prolongée. Finalement, Bergqvist (1999) a lui aussi constaté une augmentation du facteur d'élancement de semis d'épinette de Norvège (*Picea abies*) en relation avec l'augmentation de la densité du peuplement d'accompagnement.

Par ailleurs, le rapport H/D de l'érable à sucre et celui du cerisier tardif diffèrent significativement de celui du chêne à gros fruits et du noyer noir par des valeurs supérieures et ce, pour les deux sites (Figure 14). Cette différence marquée représente

la forme initiale des plants provenant de la pépinière. Les plants d'érable à sucre et de cerisier tardif étaient allongés, filiformes et de faible diamètre au collet tandis que les plants de noyer noir et de chêne à gros fruits présentaient un plant court, à bon diamètre au collet et au pivot important.

#### *Effets des traitements sur le taux de fluorescence chlorophyllienne*

Le taux de fluorescence chlorophyllienne des plants d'arbres de cerisier tardif sur le site Trépanier diffère significativement ( $p=0,03$ ) selon les traitements (Tableau XI). Les traitements trouées nord et sud se démarquent du traitement accompagné par des valeurs supérieures tandis que le traitement dégagé affiche une valeur médiane. De plus, cette combinaison espèce-site obtient les taux de fluorescence chlorophyllienne les plus élevés avec une moyenne, tous traitements confondus, de 0,811 (Tableau XI). Pour ce qui est du chêne à gros fruits, on observe une forte tendance en 2003 à la différenciation du taux de fluorescence chlorophyllienne entre les traitements, mais non statistiquement significative ( $p=0,04$  sur le site Trépanier et  $p=0,08$  sur le site Caza). De manière générale et plus particulièrement sur le site Caza, la tendance est à l'effet que les traitements trouées nord et sud se démarquent des traitements dégagé et accompagné par des valeurs supérieures de fluorescence chlorophyllienne.

Les quelques différences significatives dans le rapport  $F_v/F_m$  moyen entre les traitements semblent indiquer que les plants d'arbres d'érable à sucre, de noyer noir et de cerisier tardif (site Caza) affichaient une vigueur équivalente en 2003 d'un traitement à l'autre pour un même site. Or, l'évaluation du taux de fluorescence chlorophyllienne est un bon indice du rendement photosynthétique potentiel d'une feuille en fonction d'un stress environnemental (Srivastava et Strasser, 1996; Méthy *et al.* 1997; Percival et Sherriffs, 2002). La comparaison des taux moyens de  $F_v/F_m$  obtenus entre les sites nous indiqueraient de meilleures conditions sur le site Trépanier en comparaison à Caza pour les plants de cerisier tardif (0,811 vs 0,761) et de chêne à gros fruits (0,761 vs 0,715), dans tous les cas une seule valeur étant inférieure à 0,750 (Tableau XI). Cette relation est aussi vraie lorsque l'on compare la moyenne obtenue pour toutes espèces et tous traitements confondus par site (0,783 vs 0,758) (Tableau XI). Par contre, les plants de noyer noir présentent des taux similaires de  $F_v/F_m$  sur les deux sites (0,783 vs 0,788) (Tableau XI).



Les rapports  $F_v/F_m$  moyens relevés en 2003 varient pour le site Caza entre un minimum de 0,671 chez le chêne à gros fruits dans le traitement accompagné et un maximum de 0,807 chez le noyer noir dans le traitement trouée sud (Tableau XI). Chez Trépanier, la valeur minimale est de 0,733 encore une fois obtenue chez le chêne à gros fruits dans le traitement accompagné et la valeur maximale est de 0,839 cette fois enregistrée chez le cerisier tardif dans le traitement dégagé (Tableau XI). Ces valeurs sont inférieures à la valeur moyenne mentionnée par Björkman et Demmig (1987) pour des feuilles d'arbres décidus. On peut supposer que la phase d'établissement des plants induise un stress différent selon les espèces d'arbres à l'étude ce qui explique les dissemblances entre les valeurs obtenues.

### ***Effets des variables environnementales sur les variables biotiques***

Les deux principaux objectifs de l'analyse canonique de redondance sont de déterminer les variables environnementales qui discriminent les espèces entre elles sur chacun des deux sites et de déterminer, parmi les variables environnementales mesurées, celles qui présentent un bon potentiel explicatif. La RDAp a été menée par espèce et par site afin de considérer : les plants reboisés comme des objets, les variables de croissance (la hauteur totale, le diamètre au collet et la longueur de la pousse annuelle du plant) et de vigueur (le rapport  $F_v/F_m$ ) comme les variables réponses alors que les variables environnementales étaient représentées par l'humidité dans le sol après sept jours sans pluie ainsi que par les variables témoignant de l'importance de la végétation d'accompagnement (le %DFPP disponible à hauteur de la cime du plant, la distance moyenne entre la compétition ligneuse et le plant, la hauteur moyenne de la compétition ligneuse, le recouvrement total en espèces herbacées et ligneuses en périphérie du plant).

### ***Résultats de la RDA polynomiale***

Le modèle issu de l'analyse canonique de redondance polynomiale permet d'expliquer la variance de la croissance et des caractéristiques morphologiques de l'ensemble des espèces reboisées dans une proportion de 32,9% et 50,1% et de 18,3% et 38,0% respectivement pour chacun des axes des sites Caza et Trépanier (Tableau XII). De plus, les deux axes canoniques du modèle sont significatifs (de  $p \leq 0,001$  à  $p \leq 0,037$  pour le site Caza et de  $p \leq 0,001$  à  $p \leq 0,016$  pour le site Trépanier) pour les quatre espèces (Tableau XII). Pour les deux sites, l'apport conjoint du premier axe (de 16,0% à 36,1%

sur le site Caza et de 9,7% à 27,9% sur le site Trépanier) et du deuxième axe (de 7,3% à 13,2% sur le site Caza et de 4,1% à 12,2% sur le site Trépanier) est intéressant car il permet de positionner les vecteurs des variables sur les ordinations selon les deux axes; un premier fort et un second parfois discutable (Tableau XII). Toutefois, le modèle issu de l'érable à sucre sur le site Trépanier est moins concluant compte tenu de la plus faible proportion de la variance expliquée pour l'ensemble des axes (18,3%).

En général, les plants d'arbres semblent bien répondre aux variables qui caractérisent l'intensité de l'accompagnement végétal périphérique de par sa hauteur (Htcomp), sa distance au plant (Dcomp), son recouvrement en espèces ligneuses (Rlign) et herbacées (Rherb) (Figure 15). La variable humidité du sol mesurée après sept jours sans pluie (Hum7) est également représentée par un vecteur important. Par contre, le vecteur associé à la ressource lumineuse disponible à hauteur de la cime du plant (Lcime) est généralement de courte dimension à l'exception du noyer noir sur le site Caza (Figure 15) et du cerisier tardif sur le site Trépanier (Figure 16). Toutefois, ces vecteurs pointent dans des directions contraires ou inattendues par rapport à certaines variables réponses ce qui compliquent l'interprétation des résultats de l'ordination.

Pour l'ensemble des espèces, la hauteur totale du plant (Ht) est la variable biotique qui apparaît la mieux corrélée aux variables environnementales. Elle est fortement associée positivement à la hauteur moyenne de la végétation d'accompagnement (Htcomp) (Figures 15 et 16). Ce résultat s'apparente à ceux de plusieurs travaux de recherche (Collet et Frochot, 1992; Wilhelm et Raffel, 1993; Heinrich, 1996) qui affirment que la croissance en hauteur des arbres est directement liée à l'importance de la compétition. Selon Landaïs (1995), plus les plants sont gainés par une végétation ligneuse et meilleure est leur croissance en hauteur, au détriment du diamètre, car ces derniers recherchent constamment la pleine lumière. Schultz et Thompson (1997) et Noland *et al.* (2001) mentionnent, quant à eux, un retard dans le développement racinaire. Les risques d'instabilité des plants d'arbres seraient par conséquent supérieurs à long terme. Toutefois, dans le cas présent, on peut penser que lorsque les arbres supplanteront la végétation d'accompagnement en reprise au sein de la bande dégagée, ce phénomène d'élancement du plant s'estompera progressivement.

Le diamètre au collet (Do) est lui aussi associé positivement à la hauteur moyenne de la compétition (Htcomp) pour l'ensemble des espèces à l'exception du chêne à gros fruits

sur le site Trépanier (Figures 15 et 16) où il est lié positivement à la distance moyenne de la compétition ( $D_{comp}$ ) (Figure 16). Cette relation est aussi observée chez le cerisier tardif sur le site Caza (Figure 15) et le noyer noir sur le site Trépanier (Figure 16).

L'indice de vigueur du plant, exprimé par le rapport  $F_v/F_m$  ( $F_v/F_m$ ) est plus particulièrement associée à l'humidité du sol (Hum7) sur le site Caza, le site le plus sec (Figures 11 et 15). Compte tenu de la sécheresse prolongée en 2002 et des faibles précipitations enregistrées en 2003, cette relation s'exprime par des croissances réduites en hauteur et en diamètre observées sur le site Caza (Figures 13 et 14) comparativement au site Trépanier où la variable humidité du sol (Hum7) ne semble pas être corrélée avec les variables réponses du modèle (Figure 16). Toujours sur le site Caza, la longueur de la pousse annuelle (Acc) du cerisier tardif et de l'érable à sucre est associée positivement à l'humidité du sol (Hum7) (Figure 15) ce qui confirme l'hypothèse du rôle prépondérant de l'eau disponible sur ce site. Sur le site Trépanier, le rapport  $F_v/F_m$  ( $F_v/F_m$ ) est associé négativement au recouvrement total en espèces herbacées (Rherb) ce qui est conforme à plusieurs travaux réalisés en jeunes plantations (Davies, 1985; Cogliastro 1993; 1997; Fournier, 2003) (Figure 16). Toutefois, cette tendance exclut le cerisier tardif où le rapport  $F_v/F_m$  ne présente pas d'intérêt pour le modèle. Enfin, de manière générale, plus le sol d'un site est humide et plus la compétition en espèces herbacées y est forte. Par contre, pour le site Trépanier, le %DFPP disponible à 50cm du sol semble un facteur qui limite la vigueur de la reprise en espèces herbacées comparativement au site Caza (Figure 9).

Pour le chêne à gros fruits, la longueur de la pousse annuelle (Acc) s'accroît avec la distance moyenne de la compétition en espèces ligneuses ( $D_{comp}$ ) (Figures 15 et 16). Une explication probable de ce résultat est que cette espèce présente un degré de tolérance à l'ombre variant d'intolérant à intermédiaire (Johnson, 1990; Williams, 1990). Afin d'obtenir des conditions optimales de croissance pour cette espèce, il faut donc qu'une certaine distance sépare le plant de la végétation d'accompagnement et que la végétation d'accompagnement soit d'une hauteur appréciable afin de stimuler la croissance en hauteur du plant. Dans le cas du noyer noir, la longueur de la pousse annuelle (Acc) est associée à la hauteur moyenne de la compétition ( $H_{tcomp}$ ) et à la distance de la compétition en espèces ligneuses ( $D_{comp}$ ) (Figures 15 et 16).

Finalement, sur le site Trépanier, la longueur de la pousse annuelle (Acc) du cerisier tardif est corrélée positivement au % de DFPP disponible à hauteur de la cime (Lcime) (Figure 16). L'eau disponible dans le sol n'étant pas une contrainte sur ce site, la croissance annuelle en hauteur du cerisier tardif semble déterminée par la quantité de lumière disponible, ce qui est en accord avec le degré de tolérance à l'ombre intermédiaire de cette espèce (Marquis, 1990). Pour ce qui est de l'érable à sucre, une espèce très tolérante à l'ombre (Godman *et al.* 1990), la longueur de la pousse annuelle (Acc) est associée positivement à la hauteur moyenne de la compétition ligneuse (Htcomp) (Figure 16).

## Conclusion

Sur le plan économique, le reboisement est considéré comme un traitement sylvicole à frais élevé. L'aménagiste forestier cherche donc la meilleure production possible au moindre coût. Afin de réduire le coût des plantations, la sylviculture d'aujourd'hui se tourne vers les plantations à larges espacements. Toutefois, les plants d'arbres reboisés à faible densité poussent généralement en pleine lumière pendant plusieurs années et ce, jusqu'à la fermeture de la canopée. Dans de telles conditions, il est difficile de viser la production d'arbres de grande qualité. En effet, contrairement aux plantations à forte densité, il n'existe pas d'effet d'auto-accompagnement (exercé entre les arbres-objectifs) pour améliorer la forme des arbres en favorisant le développement vertical de l'axe principal et l'élagage naturel. La sylviculture de faible densité oblige donc le sylviculteur à intervenir régulièrement pour réaliser des tailles de formation afin de corriger certains défauts de forme. Le reboisement d'arbres en plantation sur friches arbustives, par le maintien d'une végétation compagne en périphérie des plants, se veut donc une méthode intéressante par la réduction des coûts associés à la taille et par la conservation de la biodiversité de la communauté en place, le tout permettant d'atteindre un meilleur développement des arbres-objectifs dans les plantations à large espacement.

Deux années après la mise en terre, l'établissement d'espèces d'arbres feuillus à bois noble en plantation sur arbustaies, selon différents traitements qui expriment un gradient d'intensité d'accompagnement, a été réussi. Les traitements envisagés dans le cadre de cette étude constituent des interventions adéquates pour permettre le développement initial de quatre espèces d'arbres feuillus. En effet, les taux de survie des plants d'arbres ont été excellents pour toutes les espèces, peu importe le traitement, à l'exception de l'érable à sucre sur le site Caza où l'utilisation de plants de plus forte dimension devrait être envisagée, lors de prochaines plantations sur dépôts glaciaires, afin d'améliorer le taux de réussite de cette espèce.

Après deux années de croissance des plants, aucun des traitements n'a montré un avantage qui était généralisé pour toutes les espèces sur les deux sites malgré des différences marquées au niveau de l'importance de la végétation d'accompagnement en périphérie des plants et de la quantité de lumière disponible. En effet, en 2003, la

hauteur totale, le diamètre au collet, la longueur de la pousse annuelle et le taux de fluorescence chlorophyllienne des plants des traitements dégagé et accompagné, toutes espèces confondues, ne se distinguaient pas significativement bien que ces traitements étaient fortement contrastés en terme de proximité latérale entre l'accompagnement arbustif et les arbres-objectifs. Le dégagement de la cime vivante des plants permettant le maintien d'une ouverture dans la canopée arbustive par opposition à l'élimination complète de la végétation concurrente présente dans l'environnement immédiat du plant est donc une alternative sylvicole très intéressante tant au point de vue écologique qu'économique : en réduisant les efforts d'entretien des plants, en stimulant la croissance en hauteur des plants et en diminuant les risques d'abroussement.

Sur le site Trépanier, la croissance du cerisier tardif, de l'érable à sucre et du noyer noir est reliée aux caractéristiques de son environnement immédiat. En effet, le gradient d'importance de la végétation d'accompagnement, exprimé entre les différents traitements du site Trépanier, a modifié significativement le facteur d'élancement des plants de ces espèces selon les traitements. Cette modification morphologique du rapport hauteur totale/diamètre au collet des plants en fonction de l'intensité de l'accompagnement pourrait modifier notre vision des activités d'entretien des plantations. En effet, des gains de croissance en hauteur, obtenus tôt dans développement initial de jeunes plants, pourraient favoriser leur survie en permettant de surclasser plus rapidement la végétation de la strate arbustive concurrente tout en favorisant la production d'un fût rectiligne.

Deux années après la mise en terre des plants, l'importance de la reprise de la végétation d'accompagnement et la croissance des plants d'arbres varient entre les sites Caza et Trépanier qui présentent des conditions édaphiques différentes. En effet, les valeurs moyennes d'humidité du sol plus grande du site Trépanier, confirmée par des proportions moyennes de limon et d'argile plus élevées qui avantage son pouvoir de rétention, influence directement la croissance en hauteur et en diamètre des plants d'arbres (Tableaux IV et X). Sur ce site, les différents traitements envisagés dans le cadre de la présente étude se contrastent davantage en terme d'importance de la végétation d'accompagnement alors que sur le site Caza, seul le traitement dégagé se démarque des autres par une plus grande proportion de plants affectés par une faible compétition ligneuse. Dans une moindre mesure, la différence d'âge des communautés en place sur les sites Caza et Trépanier pourrait avoir une incidence sur ces résultats.

Enfin, cette différence entre les sites s'est aussi exprimée par la vigueur des plants d'arbres reboisés sur le site Trépanier; ces derniers ayant obtenu de meilleurs gains de croissance en hauteur et en diamètre, toutes espèces confondues, autant en 2002 qu'en 2003.

Cette étude confirme le grand profit à tirer d'un accompagnement dans les plantations à faible densité. Son rôle crucial est d'améliorer la qualité et la forme des tiges des arbres-objectifs. L'ombre latérale de la végétation d'accompagnement est ainsi très favorable dans le jeune âge pour le développement des arbres-objectifs, lorsqu'on poursuit un objectif de production sylvicole.

Toutefois, les résultats obtenus laissent croire que le succès des plantations pourrait différer d'un site à l'autre, dépendant de la vigueur de la reprise végétale dans les prochaines années. En effet, la variabilité de développement des espèces, en fonction des traitements et des variables environnementales, ne permet pas dans l'immédiat d'établir avec exactitude la gamme des prescriptions sylvicoles à envisager pour l'aménagement des arbustaies sur dépôts glaciaires. Il est nécessaire à ce moment-ci d'accentuer la collecte de données sur une plus grande variété de sols afin d'analyser l'influence édaphique en interaction avec la végétation d'accompagnement sur la croissance des plants d'arbres établis artificiellement en friches arbustives. De plus, il sera intéressant de surveiller, à court et à moyen terme, les différences dans le rétablissement du couvert de la végétation en place entre les traitements trouée et accompagné. L'avenir de ces traitements dépendra du maintien, de l'amplification ou de la perte des effets positifs de l'accompagnement sur le milieu et la croissance des jeunes plants d'arbres.

## Bibliographie

Adjers, G., S. Hadengganan, J. Kuusipalo, K. Nuryanto, et L. Vesa. 1995. Enrichment planting of dipterocarps in logged-over secondary forests: effect of width, direction and maintenance method of planting line on selected *Shorea* species. *Forest Ecology and Management* 73: 259-270.

Agestam, E., P.M. Eko, U. Nilsson et N.T. Welander. 2003. The effects of shelterwood density and site preparation on natural regeneration of *Fagus sylvatica* in southern Sweden. *Forest Ecology and Management* 176: 61-73.

Ballaré, C.L., A.L. Scopel et R.A. Sanchez. 1990. Far-red radiation reflected from adjacent leaves : an early signal of competition in plant canopies. *Science* 247 : 329-332.

Bariteau, L. 1988. La carte géomorphologique au 1 :20 000 de modelé polygéniques : un exemple des basses terres du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, 185p.

Barg, A. et R.L. Edmonds. 1999. Influence of partial cutting on site microclimate, soil nitrogen dynamics, and microbial biomass in Douglas-fir stands in western Washington. *Canadian Journal of Forest Research* 29 : 705-713.

Bazile, V., N. Durand, et G. Doyon. 2002. L'utilisation de la fluorescence pour l'évaluation non-destructive de la qualité des fruits et légumes. 1. Tests préliminaires. Agriculture et Agrolimentaire Canada. 22p.

Beaudet, M. et C. Messier. 1998. Growth and crown and leaf morphological responses of *Betula alleghaniensis*, *Acer saccharum* and *Fagus grandifolia* saplings growing under a natural light gradient. *Canadian Journal of Forest Research* 28 : 1007-1015.

Becquey, J. 1992. Les plantations de feuillus précieux, d'abord éviter les erreurs. *Forêt Entreprise* 81 : 32-38.



Becquey, J. 1997. Plantations de noyers avec "accompagnement ligneux". Forêt Entreprise 118 : 16-20.

Benjamin, K. 2000. Établissement d'espèces d'arbres feuillus en friches arbustives dans le sud-ouest du Québec selon diverses intensités d'accompagnement. Mémoire de maîtrise. Université de Montréal, Montréal, 59p.

Benjamin, L.R. 1993. Experimental discrimination between contrasting models of neighborhood competition. *Journal of Ecology* 81 : 417-423.

Bergelson, J. 1993. Details of local dispersion improve the fit of neighborhood competition models. *Oecologia* 95 : 299-302.

Bergeron, Y., A. Bouchard et A. Leduc. 1988. Les successions secondaires dans les forêts du Haut-Saint-Laurent, Québec. *Naturaliste Canadien* 115 : 19-38.

Bergqvist, G. 1999. Wood volume yield and stand structure in Norway spruce understorey depending on birch shelterwood density. *Forest Ecology and Management* 122 : 221-229.

Berkowitz, A.R., C.D. Canham et V.R. Kelly. 1995. Competition vs. facilitation of tree seedling growth and survival in early successional communities. *Ecology* 76: 1156-1168.

Bernard, C.H. 1987. Étude sur les potentialités de production de plantations mélangées dans le département du Puy-de-Dôme. CEMAGREF, Centre National de Production Rurale. 47p.

Binkley, D. 1984. Ion exchange resin bags: factors affecting estimates of nitrogen availability. *Soil Science Society of America Journal* 48 : 1181-1184.

Björkman, O. et B. Demmig. 1987. Photon yield of O<sub>2</sub>-evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77K among vascular plants of diverse origins. *Planta* 170 : 489-504.

Bouchard, A., S. Dyrda, Y. Bergeron et A. Meilleur. 1989. The use of notary deeds to estimate the change in the composition of 19th century forest, in Haut-Saint-Laurent, Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 19 : 1146-1150.

Bouchard, A. et G. Domon. 1997. The transformation of the natural landscape of the Haut-Saint-Laurent (Quebec) and their implications on future resource management. *Landscape and Urban Planning* 37 : 99-107.

Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54 : 464-465.

Brand, D.G. 1986. A competition index for predicting the vigour of planted Douglas-fir in southwestern British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research* 16 : 23-29.

Brisson, J., Y. Bergeron, et A. Bouchard. 1988. Les successions secondaires sur sites mésiques dans le Haut-Saint-Laurent. *Canadian Journal of Botany* 66 : 1192-1203.

Brisson, J. et A. Bouchard. 2003. Human activities caused major changes in tree species composition in southern Quebec, Canada. *Ecoscience* 10 : 236-246.

Burton, P.J. 1993. Some limitations inherent to static indices of plant competition. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 2142-2152.

Callaway, R.M. et L.R. Walker. 1997. Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities. *Ecology* 78: 1958-1965.

Cannell, M.G.R. et J. Grace. 1993. Competition for light : detection measurement, and quantification. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 1969-1979.

Carnevale, N.J. et F. Montagnini. 2002. Facilitating regeneration of secondary forests with the use of mixed and pure plantations of indigenous tree species. *Forest Ecology and Management* 163 : 217-227.

Childs, S.W. et L.E. Flint. 1987. Effect of shadecards, shelterwoods, and clearcuts on temperature and moisture environments. *Forest Ecology and Management* 18 : 205-217.

Cogliastro, A., D. Gagnon et A. Bouchard. 1993. Effet des sites et des traitements sylvicoles sur la croissance, l'allocation en biomasse et l'utilisation de l'azote de semis de quatre espèces feuillues en plantation dans le sud-ouest du Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 199-209.

Cogliastro, A., D. Gagnon et A. Bouchard. 1997. Experimental determination of soil characteristics optimal for the growth of ten hardwoods planted on abandoned farmland. *Forest Ecology and Management* 96 : 49-63.

Cogliastro, A., D. Gagnon, S. Daigle et A. Bouchard. 2003. Improving hardwood afforestation success : an analysis of the effects of soil properties in southwestern Quebec. *Forest Ecology and Management* 177 : 347-359.

Collet, C. et H. Frochot. 1992. Effet d'un abri latéral artificiel sur le développement de jeunes merisiers (*Prunus avium* L.) installés en pépinière. *Revue Forestière Française* 44 : 85-90.

Davies, R. J. 1985. The importance of weed control and the use of tree shelters for establishing broadleaved trees on grass-dominated sites in England. *Forestry* 58: 167-180.

de Blois, S et A. Bouchard. 1995. Dynamics of *Thuja occidentalis* in an agricultural landscape of southern Quebec. *Journal of Vegetation Science* 6 : 531-542.

de Blois, S., G. Domon et A. Bouchard. 2001. Environmental, historical and contextual determinants of vegetation cover : a landscape perspective. *Landscape Ecology* 16 : 421-436.

Delage, M. 1998. Façonnement et métamorphose du modelé drumlinoïde par deux écoulements glaciaires successifs dans la région de Huntingdon (Sud du Québec). Thèse de doctorat, Université de Montréal, Montréal, 183p.

Denis, L. 1991. Sylviculture des feuillus précieux. Centre régional de la propriété forestière en France, Lons-le-Saunier, France. 6p.

Domon, G., A. Bouchard et M. Gariépy. 1993. The dynamics of the forest landscape of Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada): interactions between biophysical factors, perception and policy. *Landscape and urban planning* 25 : 53-74.

Environnement Canada. 2002. Service météorologique du Canada, Archives nationales d'information et de données climatologiques. Normales et moyennes climatiques au Canada 1971-2000 pour la ville de Huntingdon, Québec (En ligne). [http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/Welcome\\_f.html](http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/Welcome_f.html) (page consultée le 15 février 2004).

Environnement Québec. 2003. Sommaire climatologique du Québec, Station de Huntingdon. Direction des réseaux atmosphériques, Ministère de l'environnement du Québec, Québec, Sommaires de 2002 et 2003.

FAO. 2001. Future production from forest plantations. Forestry department, Food and Agriculture organization of the United Nations. Working paper : FP/13.

Firbank, L.G. et A.R. Watkinson. 1987. On the analysis of competition at the level of the individual plant. *Oecologia* 71 : 308-317.

Fournier, A. 2003. Scénarios pour le reboisement de feuillus nobles en friches arbustives. Mémoire de maîtrise. Université de Montréal, Montréal, 32p.

Freckleton, R.P. et A.R. Watkinson. 1997, Measuring plant neighbour effects. *Functional Ecology* 11 : 532-536.

Freckleton, R.P. et A.R. Watkinson. 1999, The mis-measurement of plant competition. *Functional Ecology* 13 : 285-287.

Gavaland, A. et J. Gauvin. 1997. Des plantations de merisier avec accompagnement d'aulne. *Forêt Entreprise* 118 : 21-26.

Godman, R.M., H.W. Yawney et C.H. Tubbs. 1990. *Acer saccharum* Marsh. –Sugar maple. p.78-91 in *Silvics of North America*: 1. Conifers; 2. Hardwoods. Agriculture

Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. vol.2, 877p.

Globensky, Y. 1987. Géologie des basses terres du Saint-Laurent. ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec, MM. 85-02. 53p.

Goldberg, D.E. 1987. Neighborhood competition in an old-field plant community. *Ecology* 68 : 1211-1223.

Goldberg, D.E. et K. Landa. 1991. Competitive effect and response : hierarchies and correlated traits in the early stages of competition. *Journal of Ecology* 79 : 1013-1030.

Grandtner, M.M. 1966. La végétation forestière du Québec méridional. Les Presses de l'Université Laval, Québec.

Harper, J.L. 1961. Approaches to the study of plant competition. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 15 : 1-39.

Harper, J.L. 1977. *Population biology of plants*. Academic Press, London, 892p.

Heinrich, L. 1996. Effet de l'accompagnement végétal sur la forme et la croissance juvénile du chêne sessile en plantation. Interaction avec le microclimat. ENGREF / INRA, France. 62p.

Hubert, M. 1987. Le taillis auxiliaire du reboiseur. *Forêt Entreprise* 46 : 36-45.

Hubert, M. 1992. La végétation d'accompagnement, un auxiliaire sylvicole à surveiller de près. *Forêt Entreprise* 82 : 39-47.

Hutchison, B.A. et D.R. Matt. 1976. Beam enrichment of diffuse radiation in a deciduous forest. *Agricultural Meteorology* 17 : 93-110.

Johnson, P.S. 1990. *Quercus macrocarpa* Michx. – Bur oak. p.686-692 in *Silvics of North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods*. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. vol.2, 877p.

Kiato, M., T.T. Lei et T. Koike. 1998. Application of chlorophyll fluorescence to evaluate Mn tolerance of deciduous broad-leaved tree seedlings native to northern Japan. *Tree Physiology* 18 : 135-140.

Kim, C., T.L. Sharik et M.F. Jurgensen. 1995. Canopy cover effects on soil nitrogen mineralization in northern red oak (*Quercus rubra*) stands in northern Lower Michigan. *Forest Ecology and Management* 76 : 21-28.

Kolb, T.E., K.C. Steiner, L.H. McCormick et T.W. Bowersox. 1990. Growth response of northern red oak and yellow-poplar seedlings to light, soil moisture and nutrients in relation to ecological strategy. *Forest Ecology and Management* 38 : 65-78.

Kosłowski, T.T., P.J. Kramer et S.G. Pallardy. 1991. *The physiological ecology of woody plants*. Academic Press, San Diego. 657p.

Landaïs, G. 1995. Incidence de la végétation adventice sur les dégâts du chevreuil. CEMAGREF, France. 27p.

Langvall, O. et G. Orlander. 2001. Effects of pine shelterwoods on microclimate and frost damage to Norway spruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 31 : 155-164.

Langvall, O. et M.O. Lofvenius. 2002. Effect of shelterwood density on nocturnal near-ground temperature, frost injury risk and budburst date of Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 168 : 149-161.

Lamprecht, H. 1989. *Silviculture in the tropics: tropical forest ecosystems and their tree species – possibilities and methods for their long-term utilization*. GTZ, Eschborn, Germany, 269p.

Li, X. et S.D. Wilson. 1998. Facilitation among woody plants establishing in an old field. *Ecology* 79: 2694-2705.

Lieffers, V.J., S.E. MacDonald et E.H. Hoog. 1993. Ecology of and control strategies for *Calamagrostis canadensis* in boreal forest sites. Canadian Journal of Forest Research 23 : 2070-2077.

Löf, M. 2000. Establishment and growth in seedlings of *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*. Influence of interference from herbaceous vegetation. Canadian Journal of Forest Research 30 : 855-864.

Mack, R.N. et J.L. Harper. 1977. Interference in dune annuals : spatial pattern and neighborhood effects. Journal of Ecology 65 : 345-363.

Makarek, V. et P. Legendre. 1999. Une méthode d'analyse canonique non-linéaire et son application à des données biologiques. Mathématiques, Informatique et Sciences Humaines 147 : 135-147.

Makarek, V. et P. Legendre. 2002. Nonlinear redundancy analysis and canonical correspondence analysis based on polynomial regression. Ecology 83 : 1146-1161.

Man, R. et V.J. Lieffers. 1999. Effects of shelterwood and site preparation on microclimate and establishment of white spruce seedlings in a boreal mixedwood forest. Forestry Chronicle 75 : 837-844.

Marquis, D.A. 1990. *Prunus serotina* Ehrh. – Black cherry. p.594-604 in Silvics of North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. vol.2, 877p.

Martin, C.W. et J.W. Hornbeck. 1989. Revegetation after strip cutting and block clearcutting in northern hardwoods: A 10-year history. USDA - Forest Service Research Paper NE-625.

Meilleur, A., A. Bouchard et Y. Bergeron. 1992. The use of understory species as indicators of landform ecosystem type in heavily disturbed forest : an evaluation in the Haut-Saint-Laurent, Quebec. Vegetatio 102 : 13-32.

- Meilleur, A., A. Bouchard et Y. Bergeron. 1994. The relation between geomorphology and forest community types of the Haut-Saint-Laurent, Quebec. *Vegetatio* 111 : 173-192.
- Meinander, O., S. Somersalo, T. Holopainen et R.J. Strasser. 1995. Scots pines after exposure to elevated ozone and carbon dioxide probed by reflectance spectra and chlorophyll a fluorescence transients. *Journal of Plant Physiology* 148 : 229-236.
- Messier, C., S. Parent et Y. Bergeron. 1998. Characterization of understory light environment in closed mixed boreal forests : effects of overstory and understory vegetation. *Journal of Vegetation Science* 9 : 511-520.
- Méthy, M., D. Gillon et C. Houssard. 1997. Temperature-induced changes of photosystem II activity in *Quercus ilex* and *Pinus halepensis*. *Canadian Journal of Forest Research* 27 : 31-38.
- Minckler, L.S., J.D. Woerheide et R.C. Schlesinger. 1973. Light, soil moisture, and tree reproduction in hardwood forest openings. USDA - Forest Service Research Paper NC-89.
- Montagnini, F., B. Eibl, L. Grance, D. Maiocco, et D. Nozzi. 1997. Enrichment planting in overexploited subtropical forests of the Paranaense region of Misiones, Argentina. *Forest Ecology and Management* 99 : 237-246.
- Morgan, R.K. 1991. The role of protective understorey in the regeneration system of a heavily browsed woodland. *Vegetatio* 92 : 119-132.
- Noland, T.L., G.H. Mohammed et R.G. Wagner. 2001. Morphological characteristics associated with tolerance to competition from herbaceous vegetation for seedlings of jack pine, black spruce, and white pine. *New Forests* 21 : 199-215.
- Orwig, D.A. et M.D. Abrams. 1994. Land-use history (1720-1992), composition and dynamics of oak-pine forests within the Piedmont and Coastal Plain of northern Virginia. *Canadian Journal of Forest Research* 24 : 1216-1225.



Pacala, S.W., et J.A. Silander. 1985. Neighborhood models of plant population dynamics. 1. Single-species models of annuals. *The American Naturalist* 125 : 385-411.

Pacala, S.W. 1986. Neighborhood models of plant population dynamics. 2. Multi-species models of annuals. *Theoretical Population Biology* 29 : 262-292.

Pan, D., G. Domon, S. de Blois et A. Bouchard. 1999. Temporal (1958-1993) and spatial patterns of land use changes in Haut-Saint-Laurent (Quebec, Canada) and their relation to landscape physical attributes. *Landscape Ecology* 14 : 35-52.

Paquette, S. et G. Domon. 1997. The transformation of the agroforestry landscape in the nineteenth century : A case study in southern Quebec (Canada). *Landscape and Urban Planning*. 37 : 197-209.

Pena-Claros, M., R.G.A. Boot, J. Dorado-Lora, et A. Zonta. 2002. Enrichment planting of *Bertholletia excelsa* in secondary forest in the Bolivian Amazon: effect of cutting line width on survival, growth and crown traits. *Forest Ecology and Management* 161 : 159-168.

Percival, G.C. et C.N. Sheriffs. 2002. Identification of drought-tolerant woody perennials using chlorophyll fluorescence. *Journal of Arboriculture* 28 : 215-223.

Pommerening, A. et S.T. Murphy. 2004. A review of the history, definitions and methods of continuous cover forestry with special attention to afforestation and restocking. *Forestry* 77 : 27-44.

Prescott, C.E. 1997. Effects of clearcutting and alternative silvicultural systems on rates of decomposition and nitrogen mineralization in a coastal montane coniferous forest. *Forest Ecology and Management* 95 : 253-256.

Putz, F.E. et C.D. Canham. 1992. Mechanisms of arrested succession in shrublands : root and shoot competition between shrubs and tree seedling. *Forest Ecology and Management* 49 : 267-275.

Ritchie, G.A. 1996. Trees of knowledge. Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada, Ottawa. 41p.

Rowe, J.S. 1972. Les régions forestières du Canada. ministère de l'Environnement , Service canadien des forêts, Ottawa. Publication N° 1300F. 172p.

Schiefthaler, U., A.W. Russell, H.R. Bolhar-Nordenkamp et C. Critchley. 1999. Photoregulation and photodamage in *Schefflera arboricola* leaves adapted to different light environments. Australian Journal of Plant Physiology 26 : 485-494.

Schmitt, J. et R.D. Wulff. 1993. Light spectral quality : phytochrome and plant competition. Trends in Ecology and Evolution 8 : 47-51.

Schreiber, U., W. Bilger et C. Neubauer. 1994. Chlorophyll fluorescence as a non-destructive indicator for rapid assessment of *in vivo* photosynthesis. Ecological Studies 100 : 49-70.

Schultz, R.C. et J.R. Thompson. 1997. Effect of density control and undercutting on root morphology of 1+0 bareroot hardwood seedlings: five-year performance of root-graded stock in the central USA. New Forests 13 : 301-314.

Schütz, J.P. 1990. Sylviculture 1. Comment gérer l'environnement. Lausanne, Suisse. 243p.

Schütz, J.P. 2001. Opportunities and strategies of transforming regular forests to irregular forests. Forest Ecology and Management 151 : 87-94.

Silander, J.A. et S.W. Pacala. 1985. Neighborhood predictors of plant performance. Oecologia 66 : 256-263.

Simard, H. et A. Bouchard. 1996. The precolonial 19th century forest of the Upper St-Lawrence Region of Quebec : a record of its exploitation and transformation through notary deeds of wood sales. Canadian Journal of Forest Research 26 : 1670-1676.

Smith, D.M. et P.M.S. Ashton. 1993. Early dominance of pionner hardwood after clearcutting and removal of advanced regeneration. *Northern Journal of Applied Forestry* 10 : 14-19.

Srivastava, A. et R. Strasser. 1996. Stress and stress management of land plants during a regular day. *Journal of Plant Physiology* 148 : 445-455.

Stover, M.E. et P.L. Marks. 1998. Successional vegetation on abandonned cultivated and pastured land in Tompkins county, New York. *Journal of the Torrey Botanical Society* 125 : 150-164.

Tatoni, T. et P. Roche. 1994. Comparison of old-field and forest revegetation dynamics in Provence. *Journal of Vegetation Science* 5 : 295-302.

Ter-Mikaelian, M.T., R.G. Wagner, F.W. Bell et C. Shropshire. 1999. Comparaison of photosynthetically active radiation and cover estimation for measuring the effects of interspecific competition on jack pine seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 29 : 883-889.

Truax, B., F. Lambert et D. Gagnon. 2000. Herbicide-free plantations of oaks and ashes along a gradient of open to forested mesic environments. *Forest Ecology and Management* 137 : 155-169.

Wagner, R.G. et S.R. Rodosevich. 1987. Interspecific competition indices for vegetation management decisions in young Douglas-fir stands on the Siuslaw National Forest: report No. 1. Department of Forest Science, College of Forestry, Oregon State University, Corvallis.

Wagner, R.G. et S.R. Radosevich. 1991. Neighborhood predictors of interspecific competition in young Douglas-fir plantations. *Canadian Journal of Forest Research* 21 : 821-828.

Wagner, R.G. 1993. Research directions to advance forest vegetation management in North America. *Canadian Journal of Forest Research* 23 : 2317-2327.

Wagner, R.G. et S.R. Radosevich. 1998. Neighborhood approach for quantifying interspecific competition in coastal Oregon forests. *Ecological Applications* 8 : 779-794.

Weigelt, A. et P. Jolliffe. 2003. Indices of plant competition - essay review. *Journal of Ecology* 91 : 707-720.

Weiner, J. 1982. A neighborhood model of annual-plant interference. *Ecology* 63 : 1237-1241.

Weiner, J. 1984. Neighborhood interference amongst *Pinus rigida* individuals. *Journal of Ecology* 72 : 183-195.

Wilhelm, G.J. et D. Raffel. 1993. La sylviculture du mélange temporaire hêtre – merisier sur le plateau Lorrain. *Revue Forestière Française* 45 : 651-663.

Williams, R.D. 1990. *Juglans nigra* L. – Black walnut. p.391-399 in *Silvics of North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods. Agriculture Handbook 654. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. vol.2, 877p.*

## **Tableaux et Figures**

Tableau I : Caractéristiques générales du dispositif expérimental

Caractéristiques	Site Caza	Site Trépanier
Drainage	Bon à rapide	Bon à moyen
Dépôt	Glaciaire (dolomie)	Glaciaire (dolomie)
Pierrosité (%)	11-15	6-10
Forme et grosseur des fragments	Graveleux à caillouteux	Graveleux à pierreux
Classe texturale dominante <sup>1</sup>	Loam / Loam sablonneux	Loam argileux
Argile (%)	16,0	25,2
Limon (%)	41,5	43,7
Sable (%)	42,5	31,1
pH	7,1	7,0
CEC	15,3	14,5
K (kg/ha)	140	163
Mg (kg/ha)	1172	1040
Ca (kg/ha)	4501	4166
P (kg/ha)	8	<5
Al (ppm)	694	686
Composition de la végétation ligneuse en reprise (trois espèces dominantes (% de recouvrement du couvert))	<i>Zanthoxylum americanum</i> (31,1) <i>Rhamnus catharticus</i> (16,8) <i>Cornus obliqua</i> (9,8)	<i>Zanthoxylum americanum</i> (58,4) <i>Rhamnus catharticus</i> (14,2) <i>Crataegus</i> sp. (5,4)
Hauteur moyenne de la communauté d'origine (m)	4-6	6-9
Âge moyen de la communauté (ans)	25-29	34-38

<sup>1</sup> Les données portant sur la classe texturale dominante, le pourcentage d'argile, de limon et de sable, le pH, la CEC et la quantité des cations échangeables proviennent de neuf échantillons de sols par site (un par rang).

**Tableau II : Principales caractéristiques des traitements à l'étude**

Traitement	Caractéristiques et interventions associées à chacun des traitements				
	Largeur de l'interbande	Largeur de la bande dégagée	Disposition des plants	Espacement des plants sur le(s) rangs	Interventions 2003
« trouée »	7 mètres	3 mètres	Dans des trouées situées à 1 mètre de la bande dégagée au sein de l'interbande	2 rangs de chaque côté de la bande dégagée, espacement de 3 mètres entre les plants	Dégagement total en périphérie immédiate du plant (1,50 mètre de diamètre)
« accompagné »	5 mètres	5 mètres	Au centre de la bande dégagée sur deux rangs espacés de 1 mètre	Espacement de 3 mètres entre les plants, les deux rangs disposés en quinconce.	Dégagement de la cime des plants en périphérie immédiate (1,50 mètre de diamètre)
« dégagé »	5 mètres	5 mètres	Au centre de la bande dégagée sur deux rangs espacés de 1 mètre	Espacement de 3 mètres entre les plants, les deux rangs disposés en quinconce.	Dégagement total en périphérie immédiate du plant (1,50 mètre de diamètre)

**Tableau III : Distribution des plants par espèce, par traitement et par site**

Traitement	« dégagé »		« accompagné »		« trouées »		Total par espèce	
Site	Caza	Trépanier	Caza	Trépanier	Caza	Trépanier	Caza	Trépanier
Cerisier tardif	37 <sup>1</sup> (6) <sup>2</sup>	66 (11)	36 (6)	54 (9)	36 (6)	36 (6)	109 (17)	156 (26)
Chêne à gros fruits	36 (5)	25 (6)	21 (4)	33 (8)	18 (4)	21 (6)	75 (13)	79 (20)
Érable à sucre	29 (6)	42 (7)	36 (6)	54 (9)	34 (6)	53 (9)	99 (18)	149 (25)
Noyer noir	27 (5)	93 (16)	24 (4)	102 (17)	18 (3)	112 (19)	69 (12)	307 (52)
Total par traitement	129 (22)	226 (40)	117 (20)	243 (43)	106 (19)	222 (40)	352 (61)	691 (123)

<sup>1</sup> Ce nombre représente le nombre total de plants au sein du dispositif.<sup>2</sup> Ce nombre représente le nombre de parcelles (groupes de plants continus) au sein du dispositif.

Tableau IV : Interventions sylvicoles réalisées en 2002 et en 2003

Intervention sylvicole	2002	2003
Préparation de terrain mécanisée	17-18 mai	
Mise en terre des plants	24 et 27 mai	
Uniformisation des bandes	2 et 4 juin	
Dégagement des corridors	12 et 17-18, 22 et 25 juin	20, 23 et 27 mai
Dégagement des plants		12, 16-17 juin
Prise de mesures initiales	4, 5 et 6 juin	
Regarni		27-28 mai
Épandage de répulsif à chevreuil (Deer Away®)		9 mai et 29 octobre

Tableau V : Distribution des effectifs par espèce, par traitement et par site

Traitement	« dégagé »		« accompagné »		« trouées nord / sud »		Total par espèce	
Site	Caza	Trépanier	Caza	Trépanier	Caza	Trépanier	Caza	Trépanier
Cerisier tardif	15	24	14	26	15 / 17 <sup>1</sup>	10 / 13	61	73
Chêne à gros fruits	15	24	13	19	8 / 7	6 / 7	43	56
Érable à sucre	18	27	19	18	13 / 12	15 / 18	62	78
Noyer noir	15	49	16	56	7 / 7	48 / 45	45	198
Total par traitement	63	124	62	119	43 / 43	79 / 83	211	405

<sup>1</sup> Le nombre de gauche représente l'effectif du traitement « trouée nord » tandis celui de droite réfère au traitement « trouée sud ».



**Tableau VI : Fréquence de plants associés à chaque classe d'indice de l'importance de la végétation d'accompagnement par traitement et par site en 2003**

<i>Site</i>	<i>Caza</i>				<i>Trépanier</i>			
Classe de compétition	0	1-300	301-600	601+	0	1-300	301-600	601+
Traitement dégagé	41	16	8	4	92 +	28 +	6	1
Traitement accompagné	25 - <sup>1</sup>	12	12	14 +	61 -	29	25 +	6
Traitement trouée nord	31	5	4	3	51	14	8	8
Traitement trouée sud	31	7	3	2	55 +	19	9	5
Effet traitement	$P(\chi^2)=0,007$				$p(\chi^2)=0,004$			

<sup>1</sup> Les fréquences observées auxquelles on a joint un symbole + ou - sont, respectivement, significativement sur ou sous représentées, sous l'hypothèse d'indépendance des traitements et de l'indice de l'importance de la végétation d'accompagnement.

**Tableau VII : Recouvrement moyen en espèces herbacées et ligneuses en périphérie des plants reboisés et effet des traitements par site en 2003**

Recouvrement total (%)	en espèces herbacées		en espèces ligneuses	
Site	Caza	Trépanier	Caza	Trépanier
Traitement dégagé	49,5	16,9 a <sup>1</sup>	22,5 a	23,6
Traitement accompagné	49,1	26,8 b	41,2 b	36,1
Traitement trouée nord	53,3	39,7 b	27,6 ab	35,6
Traitement trouée sud	57,7	38,1 b	32,1 ab	38,9
Moyenne par site	51,8	28,6	31,0	32,7
Effet traitement	p=0,61	p=0,02	p≤0,01	p=0,19

<sup>1</sup> Les moyennes de recouvrement en espèces herbacées et ligneuses qui ne sont pas affectées d'une même lettre sont significativement différentes d'un traitement à l'autre (test de Tukey). L'analyse de variance est effectuée par espèce et par site.

**Tableau VIII : Nombre de plants morts (M) et vivants (V) par espèce d'arbres, par traitement, par site et par année**

Site Caza 2002			Cerisier tardif			Chêne à gros fruits			Érable à sucre			Noyer noir			Total		
Traitement	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total		
accompagné	1	35	36	1	20	21	9	27	36	3	21	24	14	103	117		
dégagé	0	37	37	0	36	36	11	18	29	3	24	27	14	115	129		
trouée	2	34	36	2	16	18	9	25	34	3	15	18	16	90	106		
Total	3	106	109	3	72	75	29	70	99	9	60	69	44	308	352		
Site Trépanier 2002																	
Traitement	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total		
accompagné	11	43	54	2	31	33	2	52	54	3	99	102	18	225	243		
dégagé	8	58	66	3	22	25	6	36	42	2	91	93	19	207	226		
trouée	2	34	36	3	18	21	9	44	53	7	105	112	21	201	222		
Total	21	135	156	8	71	79	17	132	149	12	295	307	58	633	691		
Site Caza 2003																	
Traitement	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total		
accompagné	0	35	35	1	19	20	1	26	27	2	19	21	4	99	103		
dégagé	2	35	37	2	34	36	2	16	18	1	23	24	7	108	115		
trouée	2	32	34	3	13	16	1	24	25	2	13	15	8	82	90		
Total	4	102	106	6	66	72	4	66	70	5	55	60	19	289	308		
Site Trépanier 2003																	
Traitement	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total	M	V	Total		
accompagné	1	42	43	0	31	31	1	51	52	0	99	99	2	223	225		
dégagé	1	57	58	0	22	22	0	36	36	1	90	91	2	205	207		
trouée	1	33	34	0	18	18	0	44	44	0	105	105	1	200	201		
Total	3	132	135	0	71	71	1	131	132	1	294	295	5	628	633		

**Tableau IX : Hauteur totale moyenne des plants de l'effectif et effet des traitements  
par espèce, par site et par année**

Site	Traitement	Hauteur totale moyenne des plants (cm)							
		2002				2003			
		Cerisier tardif	Chêne à gros fruits	Érable à sucre	Noyer noir	Cerisier tardif	Chêne à gros fruits	Érable à sucre	Noyer noir
Caza	dégagé	63,4	52,1	61,5	31,6	63,8	53,9	54,3	33,1
	accompagné	60,3	54,7	64,0	33,9	72,5	59,5	54,9	42,4
	trouée nord	68,9	56,9	63,9	35,3	72,8	51,2	58,9	42,6
	trouée sud	62,9	57,0	59,8	36,4	61,8	61,5	55,0	40,9
	Moyenne par espèce	63,3	54,3	62,4	33,5	67,5	56,3	55,6	38,8
	Effet traitement	p=0,56	p=0,47	p=0,98	p=0,46	p=0,65	p=0,25	p=0,96	p=0,18
Trépanier	dégagé	69,4	55,0	68,7	37,9	81,3	65,3	77,3	55,0
	accompagné	68,5	42,1	71,2	33,1	80,3	61,7	74,5	48,4
	trouée nord	66,9	58,4	71,6	37,0	75,4	58,6	86,2	48,2
	trouée sud	74,1	68,6	73,9	36,3	88,4	72,4	82,6	46,7
	Moyenne par espèce	69,3	53,4	70,7	36,0	81,7	64,2	79,6	49,6
	Effet traitement	p=0,82	p=0,16	p=0,99	p=0,52	p=0,86	p=0,70	p=0,83	p=0,72

**Tableau X : Diamètre au collet moyen des plants de l'effectif et effet des traitements par espèce, par site et par année**

Site	Traitement	Diamètre au collet moyen des plants (mm)							
		2002				2003			
		Cerisier tardif	Chêne à gros fruits	Érable à sucre	Noyer noir	Cerisier tardif	Chêne à gros fruits	Érable à sucre	Noyer noir
Caza	dégagé	7,5	10,8	5,3 ab <sup>1</sup>	8,1	8,3	11,5	6,6	9,8
	accompagné	7,8	11,3	6,1 a	8,0	9,5	11,8	6,6	9,8
	trouée nord	7,3	11,4	5,5 ab	7,4	8,5	11,7	5,8	8,4
	trouée sud	6,9	10,1	4,8 b	7,8	7,4	11,4	5,4	7,8
	Moyenne par espèce	7,5	11,0	5,5	7,9	8,4	11,6	6,1	8,8
	Effet traitement	p=0,38	p=0,62	<b>p=0,02</b>	p=0,46	p=0,67	p=0,79	p=0,16	p=0,48
Trépanier	dégagé	8,0	14,0	6,3	8,9 a	10,0 a	16,0	8,3	11,6 a
	accompagné	7,8	13,0	6,5	8,5 a	9,4 ab	15,5	8,3	10,2 ab
	trouée nord	6,9	14,1	5,7	7,4 b	7,8 b	15,3	6,9	8,7 bc
	trouée sud	8,1	13,7	5,9	7,3 b	8,6 ab	13,4	7,4	8,0 c
	Moyenne par espèce	7,8	13,7	6,2	8,2	9,2	15,4	7,8	9,7
	Effet traitement	p=0,24	p=0,98	<b>p=0,05</b>	<b>p=0,01</b>	<b>p=0,03</b>	p=0,71	p=0,26	<b>p=0,01</b>

<sup>1</sup> Les moyennes de diamètre au collet qui ne sont pas affectées d'une même lettre sont significativement différentes d'un traitement à l'autre (test de Tukey). L'analyse de variance est effectuée par espèce, par site et par année.

**Tableau XI : Taux moyen de fluorescence chlorophyllienne et effet des traitements  
par espèce et par site en 2003**

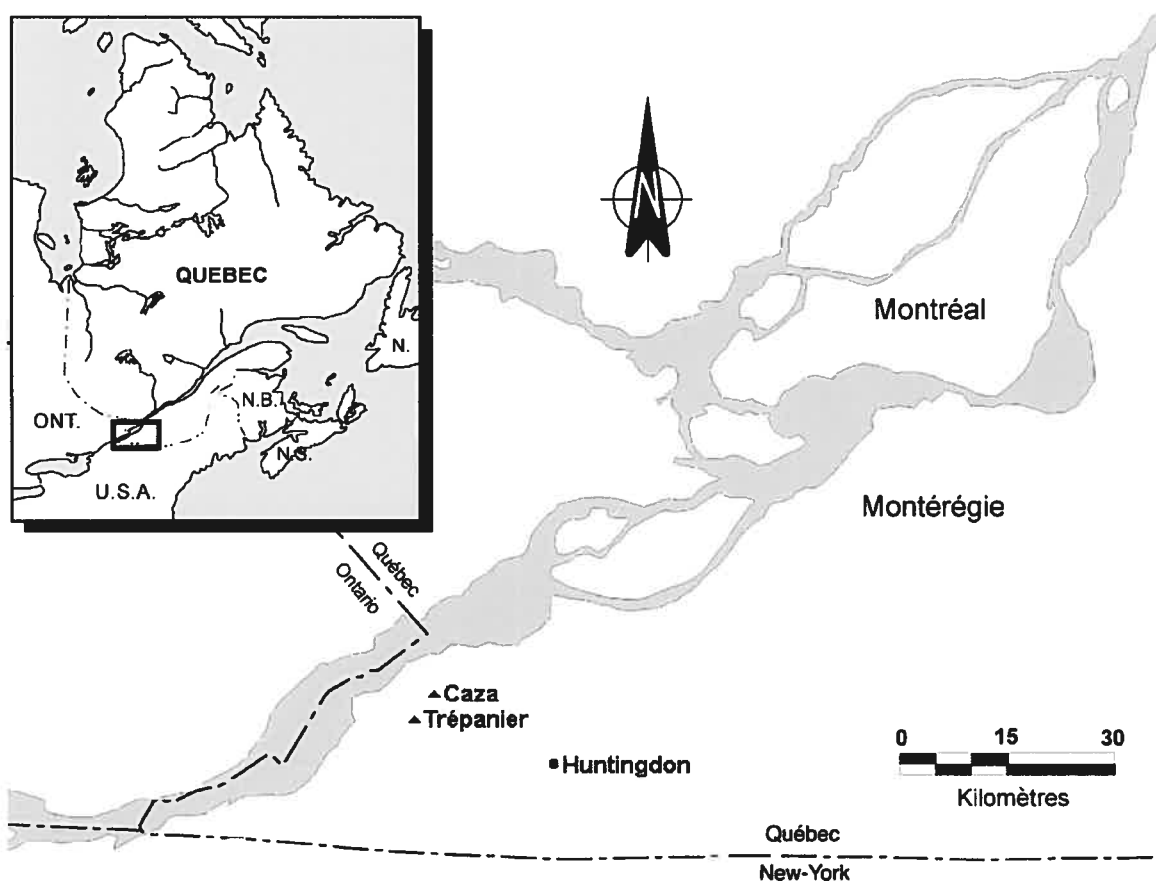
Site	Caza					Trépanier				
Espèce	Cerisier tardif	Chêne à gros fruits	érable à sucre	noyer noir	Moyenne par traitement	Cerisier tardif	Chêne à gros fruits	érable à sucre	noyer noir	Moyenne par traitement
Traitement dégagé	0,769	0,696	0,743	0,779	0,746	0,800 <sup>ab</sup>	0,733	0,772	0,777	0,772
Traitement accompagné	0,730	0,671	0,774	0,784	0,743	0,797 <sup>b</sup>	0,778	0,752	0,791	0,784
Traitement trouée nord	0,753	0,762	0,768	0,797	0,766	0,839 <sup>a</sup>	0,787	0,788	0,777	0,787
Traitement trouée sud	0,787	0,792	0,757	0,807	0,783	0,837 <sup>a</sup>	0,791	0,773	0,788	0,793
Moyenne par espèce	0,761	0,715	0,760	0,788	0,758	0,811	0,761	0,771	0,783	0,783
Effet traitement	p=0,26	p=0,08	p=0,32	p=0,99	P=0,21	p=0,03	p=0,04	p=0,16	p=0,47	p=0,21

Les moyennes de taux de fluorescence chlorophyllienne qui ne sont pas affectées d'une même lettre sont significativement différentes d'un traitement à l'autre (test de Tukey). L'analyse de variance est effectuée par espèce et par site.

**Tableau XII : Synthèse des résultats obtenus de l'analyse canonique de  
redondance polynomiale par espèce et par site**

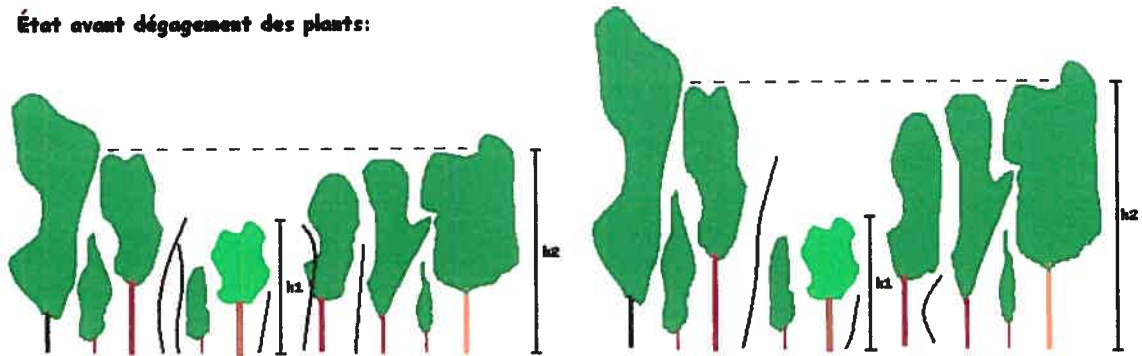
Site	Espèce	N	Nombre de variables réponses	Nombre de variables environnementales	Valeur propre			p-value
					1 <sup>er</sup> axe	2 <sup>ème</sup> axe	Σ des axes canoniques	Σ des axes canoniques
Caza	Cerisier tardif	62	4	5	0,209	0,132	0,463	0,001
	Chêne à gros fruits	46	4	4	0,168	0,120	0,357	0,037
	Érable à sucre	62	4	4	0,160	0,126	0,329	0,003
	Noyer noir	46	4	4	0,361	0,073	0,501	0,002
Trépanier	Cerisier tardif	74	4	4	0,220	0,122	0,369	0,001
	Chêne à gros fruits	58	4	4	0,175	0,112	0,380	0,001
	Érable à sucre	80	4	3	0,097	0,041	0,183	0,016
	Noyer noir	203	4	5	0,279	0,042	0,353	0,001

**Figure 1 : Localisation du territoire d'étude et des sites de plantation Caza et Trépanier**



**Figure 2 : Représentation des deux scénarios de dégagement de la cime du plant appliqué au sein des traitements accompagné et trouées nord et sud**

**État avant dégagement des plants:**



Où:  $h_1$  représente la hauteur totale du plant reboisé et  $h_2$  représente la hauteur moyenne de la végétation d'accompagnement.

Remarque: La coupe se fait à la base de la cime du plant reboisé selon le concept de "libre de croître".

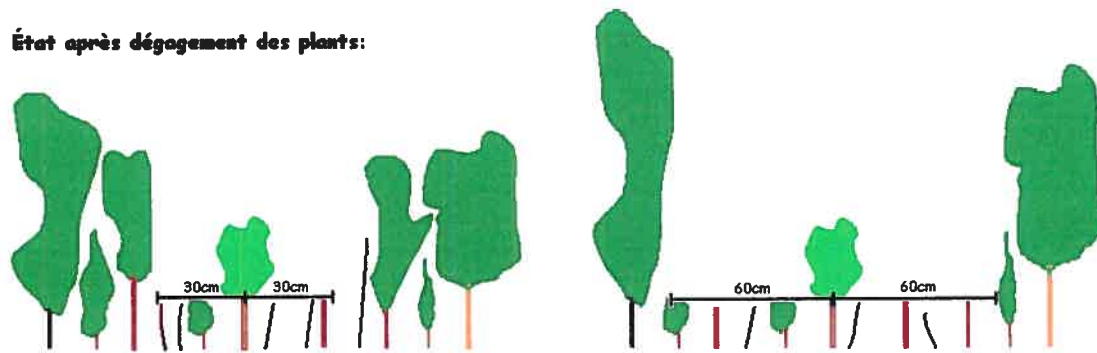
**Scénario 1:** Si  $h_2 < 2h_1$  alors le rayon d'ouverture de la cime est de 30cm.



**Scénario 2:** Si  $h_2 \geq 2h_1$  alors le rayon d'ouverture de la cime est de 60cm.



**État après dégagement des plants:**



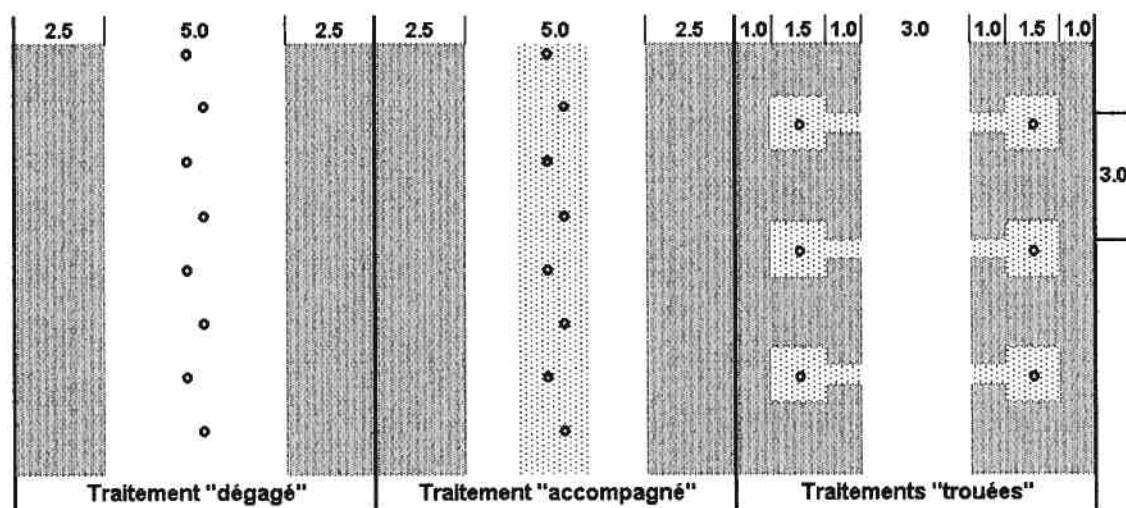
**Légende:**

— = une espèce herbacée

— = une espèce arbustive

— = l'arbre-objectif

**Figure 3 : Représentation 2D des traitements du dispositif expérimental**



**Légende:**





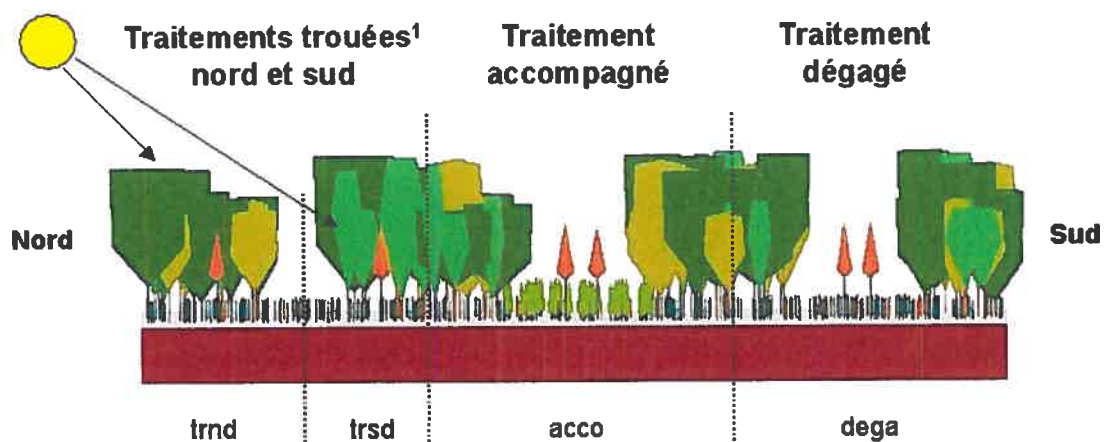
-  Interbande (végétation initiale laissée en place)
-  Rang dégagé (avec végétation en reprise)
-  Ambiance forestière (dégagement de la cime vivante du plant uniquement)
-  Plant d'arbre



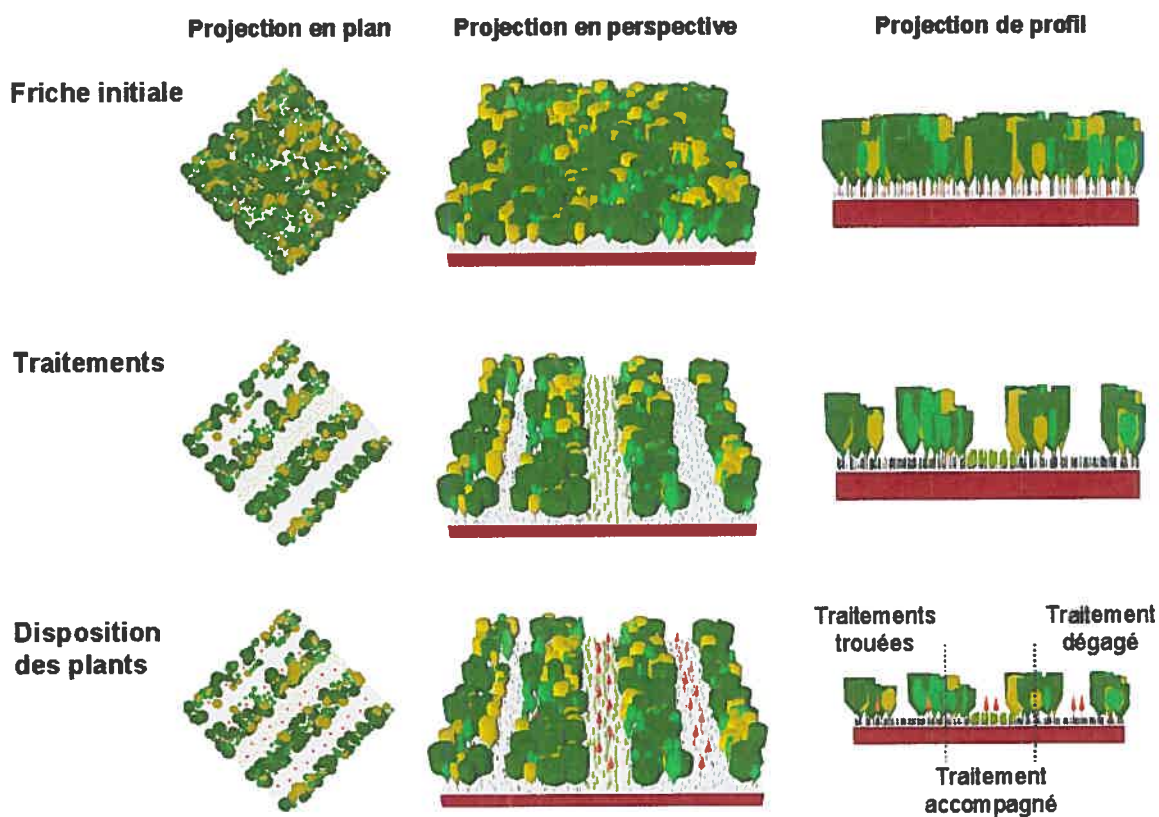


Figure 4 : Profil des quatre traitements

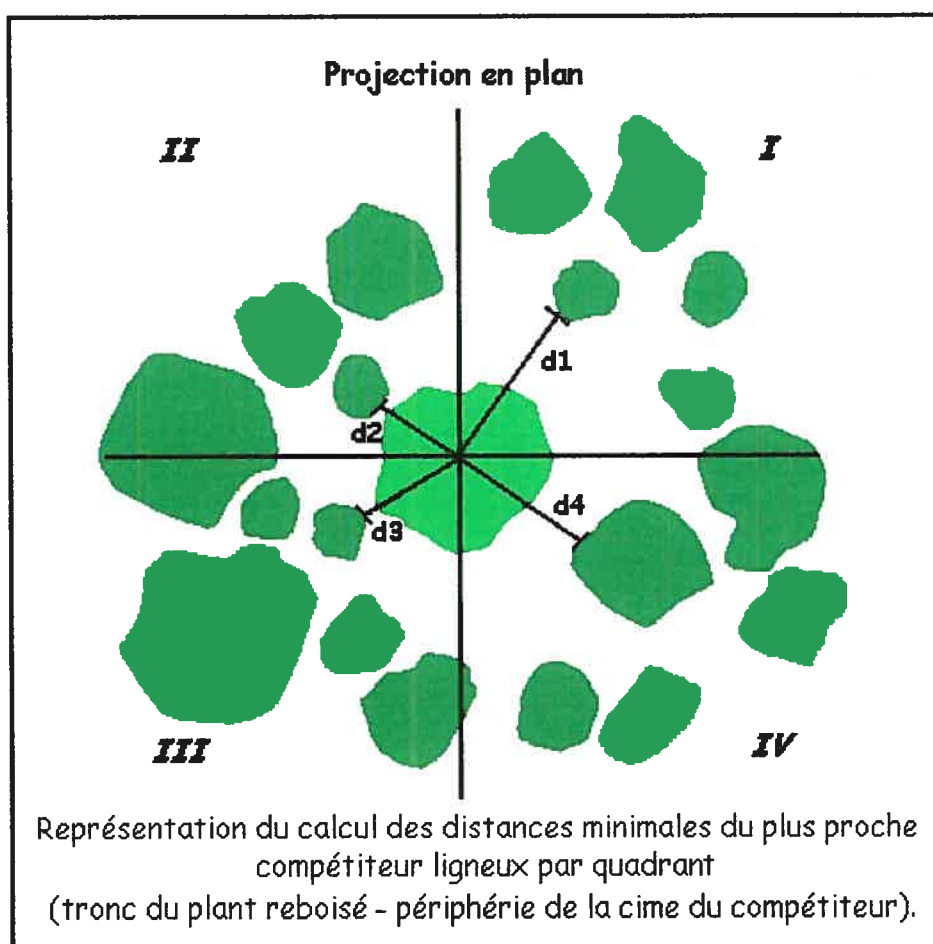


<sup>1</sup> Le traitement nommé trouées a été considéré comme induisant deux traitements distincts puisque les plants occupent le nord (trnd) et le sud (trsd) de la bande ouverte, donc soumis à différentes conditions de lumière.

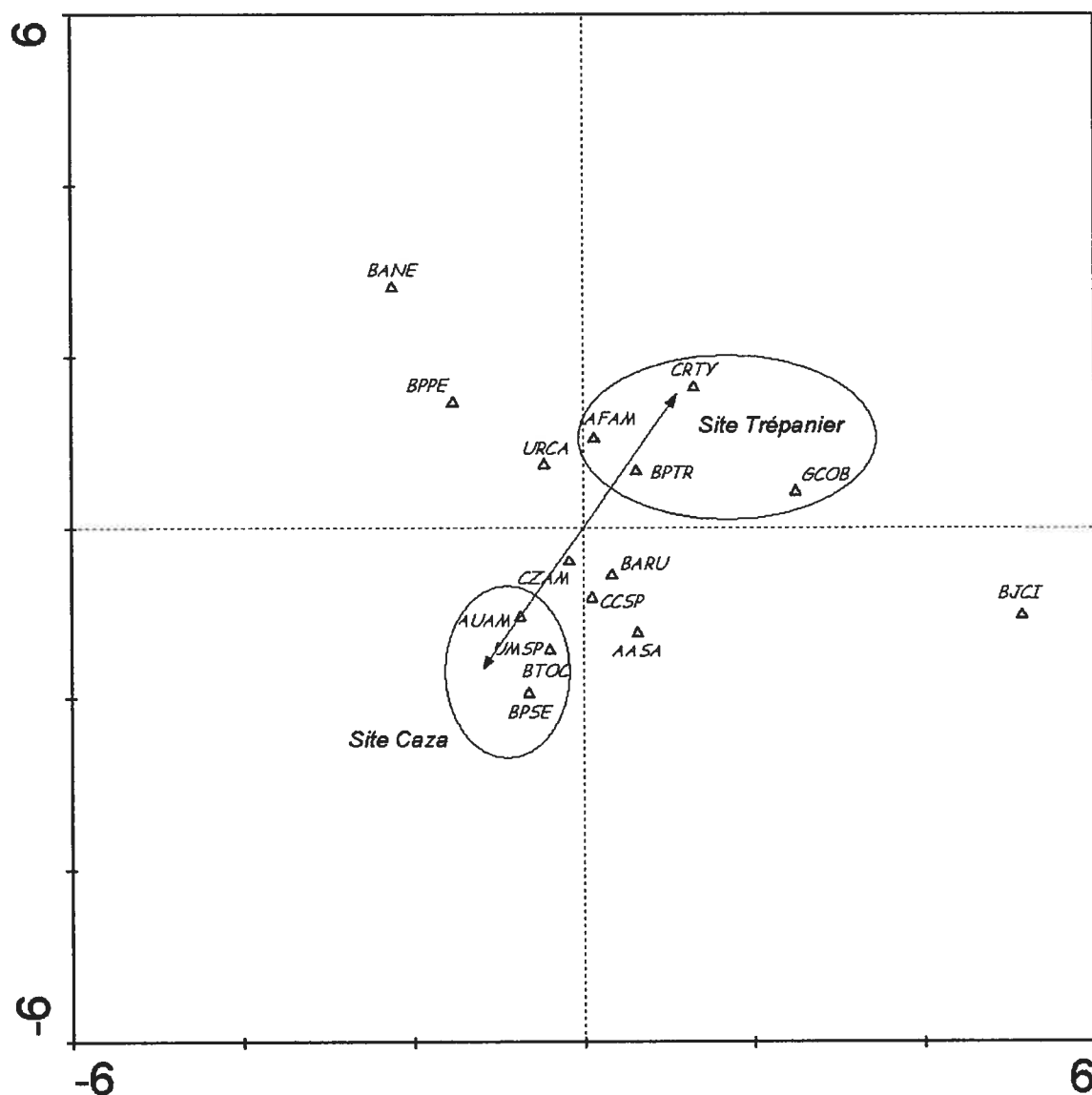
Figure 5 : Représentation 3D des traitements du dispositif expérimental



**Figure 6 : Représentation schématique de mesures de distances utilisées dans le calcul de l'indice de compétition**



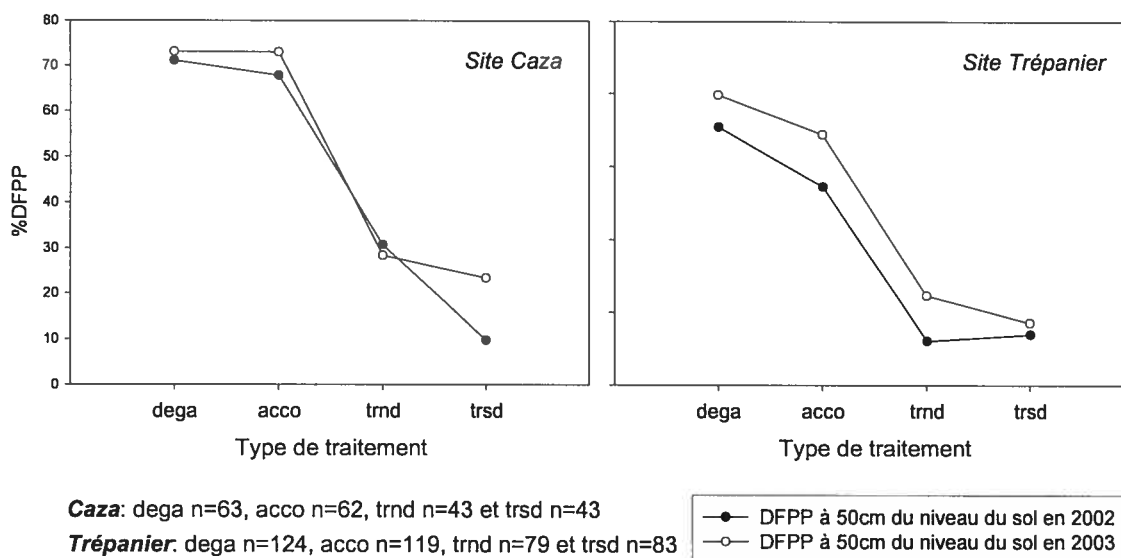
**Figure 7 : Ordination de l'AFC de la végétation d'accompagnement ligneuse en reprise**



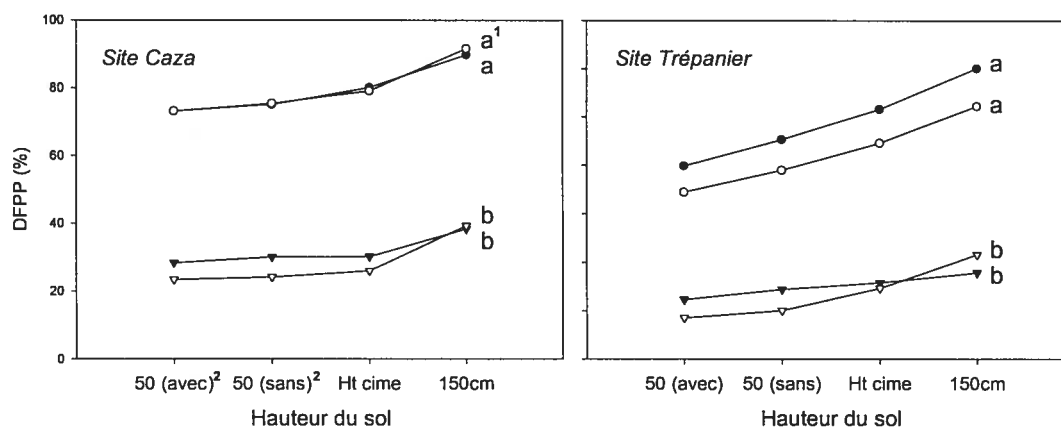
Le diagramme de double projection de l'analyse factorielle des correspondances représente les espèces ligneuses (triangles bleus) et les sites d'échantillonnage (vecteurs bleus).

Code sur l'ordination	Nom de l'espèce	Code sur l'ordination	Nom de l'espèce
AASA	<i>Acer saccharum</i>	BTOC	<i>Thuja occidentalis</i>
AFAM	<i>Fraxinus americana</i>	BVRI	<i>Vitis riparia</i>
AUAM	<i>Ulmus americana</i>	CCSP	<i>Crataegus sp.</i>
BANE	<i>Acer negundo</i>	CCST	<i>Cornus stolonifera</i>
BARU	<i>Acer rubrum</i>	CRTY	<i>Rhus typhina</i>
BPPE	<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	CZAM	<i>Zanthoxylum americanum</i>
BPCI	<i>Juglans cinerea</i>	GCOB	<i>Cornus obliqua</i>
BPSE	<i>Prunus pensylvanica</i>	UMSP	<i>Malus sp.</i>
BPTR	<i>Populus tremuloides</i>	URCA	<i>Rhamnus catharticus</i>

**Figure 8 : Proportion de densité de flux de photons photosynthétiques (%DFPP) moyenne mesurée à 50cm du niveau du sol selon le traitement et sur chaque site en 2002 et en 2003**



**Figure 9 : Proportion de densité du flux de photons photosynthétiques (%DFPP) moyenne des différents traitements selon un profil déterminé de hauteur et sur chaque site en 2003**

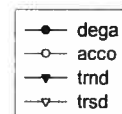


<sup>1</sup> Les différences de %DFPP entre les traitements sont valables pour chacune des quatre hauteurs mesurées. De plus, les moyennes de %DFPP obtenues, à une hauteur spécifique, qui ne sont pas affectées d'une même lettre sont significativement différentes d'un traitement à l'autre (test de Tukey). Enfin, l'analyse de variance a été effectuée par traitement et par site.

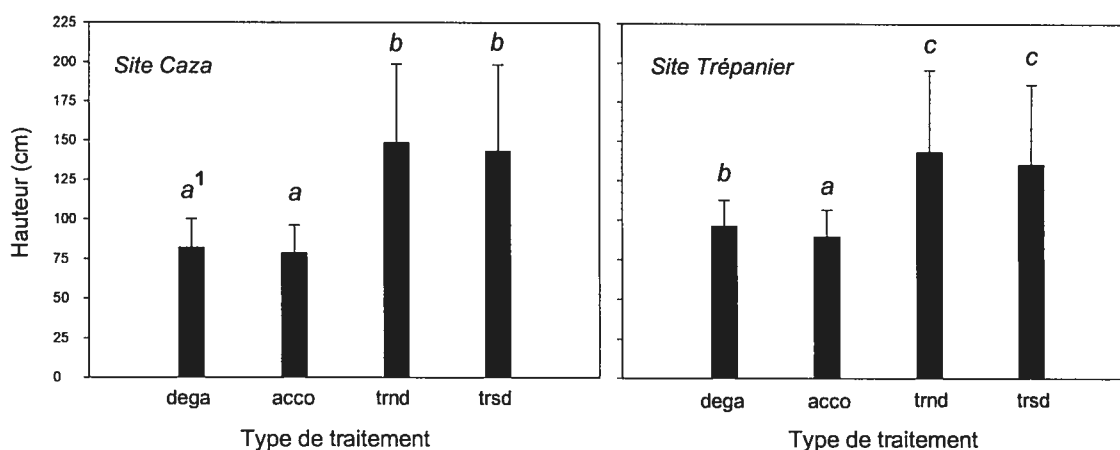
<sup>2</sup> Ces termes réfèrent à l'effet de la présence (avec) ou non (sans) de la cime du plant-objectif sur la lecture du %DFPP disponible à 50 cm.

**Caza:** dega n=63, acco n=62, trnd n=43 et trsd n=43

**Trépanier:** dega n=124, acco n=119, trnd n=79 et trsd n=83



**Figure 10 : Hauteur moyenne de la compétition ligneuse en périphérie des plants (après dégagement) par traitement et par site (juillet 2003)**

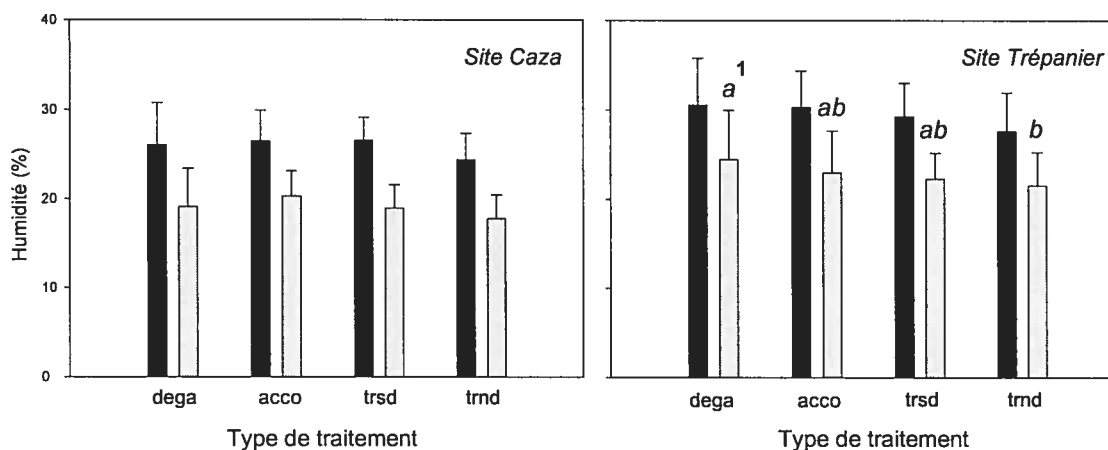


<sup>1</sup> Les moyennes de hauteur obtenues qui ne sont pas affectées d'une même lettre sont significativement différentes d'un traitement à l'autre (test de Tukey). L'analyse de variance a été effectuée par traitement et par site.

**Caza:** dega n=63, acco n=62, trnd n=43 et trsd n=43

**Trépanier:** dega n=124, acco n=119, trnd n=79 et trsd n=83

**Figure 11 : Humidité du sol après trois et sept jours consécutifs sans pluie en périphérie des plants par traitement et par site (août 2003)**

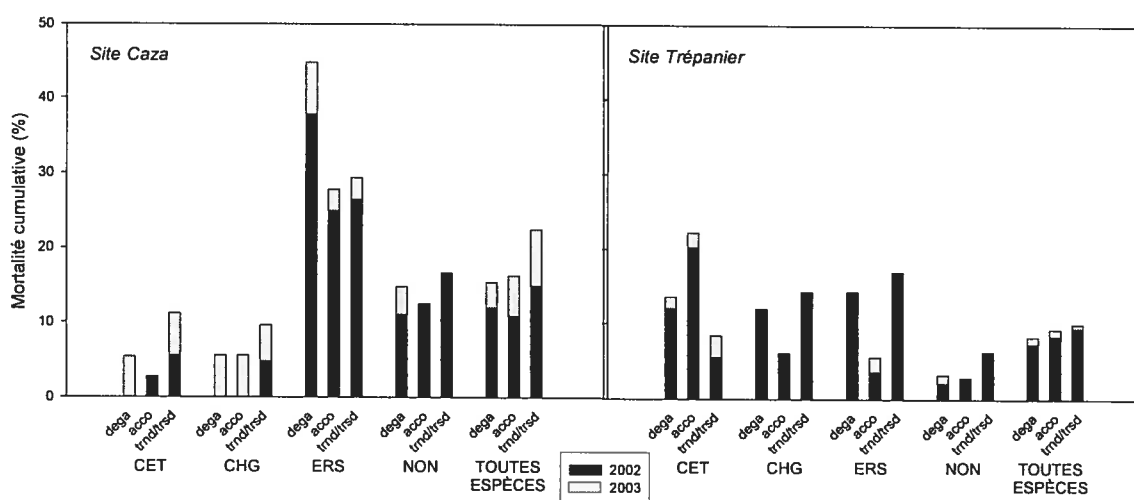


<sup>1</sup> Les moyennes d'humidité du sol obtenues qui ne sont pas affectées d'une même lettre sont significativement différentes d'un traitement à l'autre (test de Tukey). L'analyse de variance a été effectuée par traitement et par site.

**Caza:** dega n=63, acco n=62, trnd n=43 et trsd n=43

**Trépanier:** dega n=124, acco n=119, trnd n=79 et trsd n=83

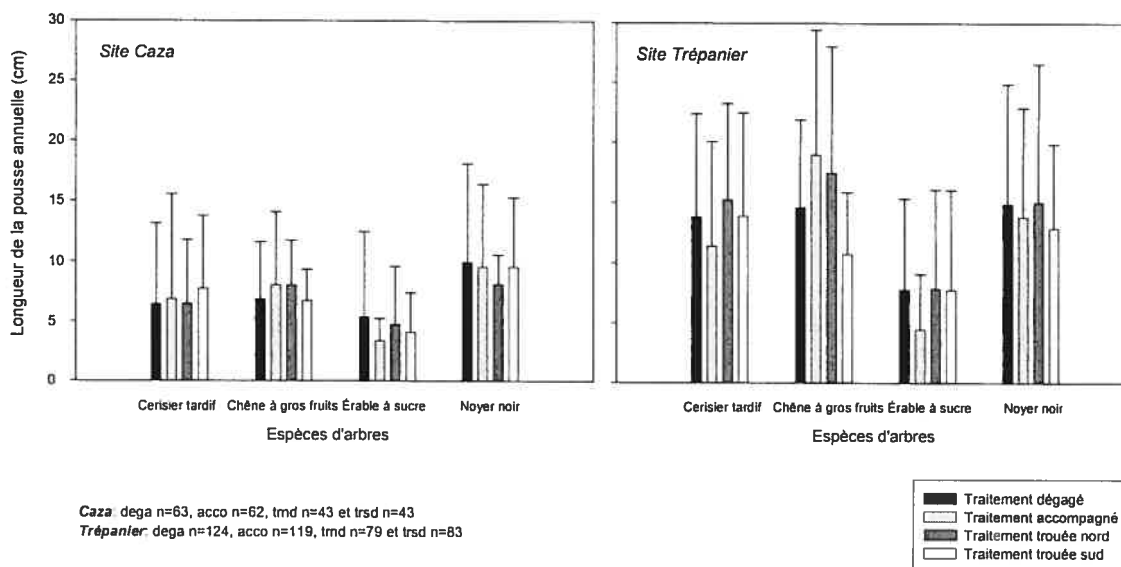
**Figure 12 : Bilan de mortalité 2002-2003 par traitement, par espèce et par site**



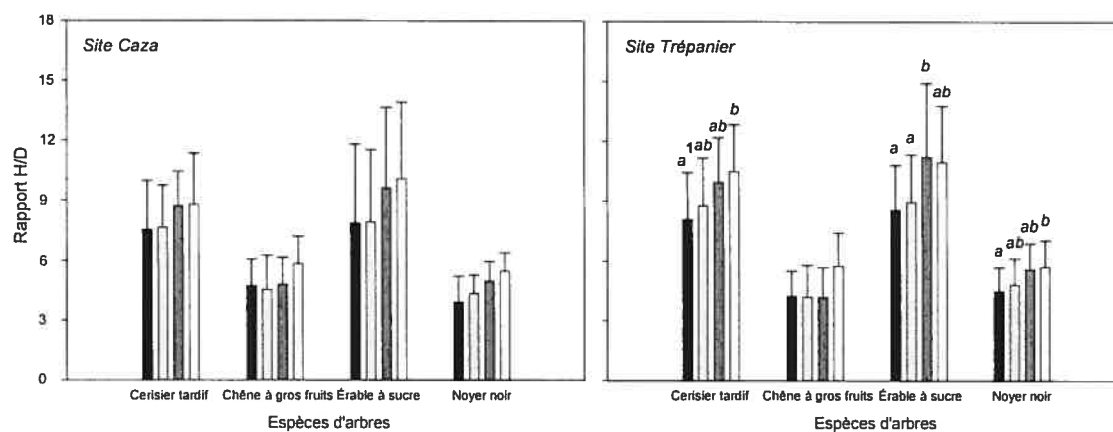
**EFFET DE L'ESPÈCE SUR LA MORTALITÉ PAR ANNÉE**  
(analyse de tableau de fréquence)

	2002	2003	2002-2003
CAZA :	CET > CHG = NON > ERS	AUCUN EFFET	CET > CHG = NON > ERS
TRÉPANIÉ :	NON > CET = CHG = ERS	AUCUN EFFET	NON > CHG = ERS > CET

**Figure 13 : Longueur moyenne de la pousse annuelle des plants par espèce, par traitement et par site en 2003**



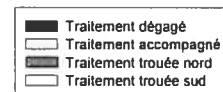
**Figure 14 : Rapport hauteur totale/diamètre au collet des plants (H/D) moyen par espèce, par traitement et par site en 2003**



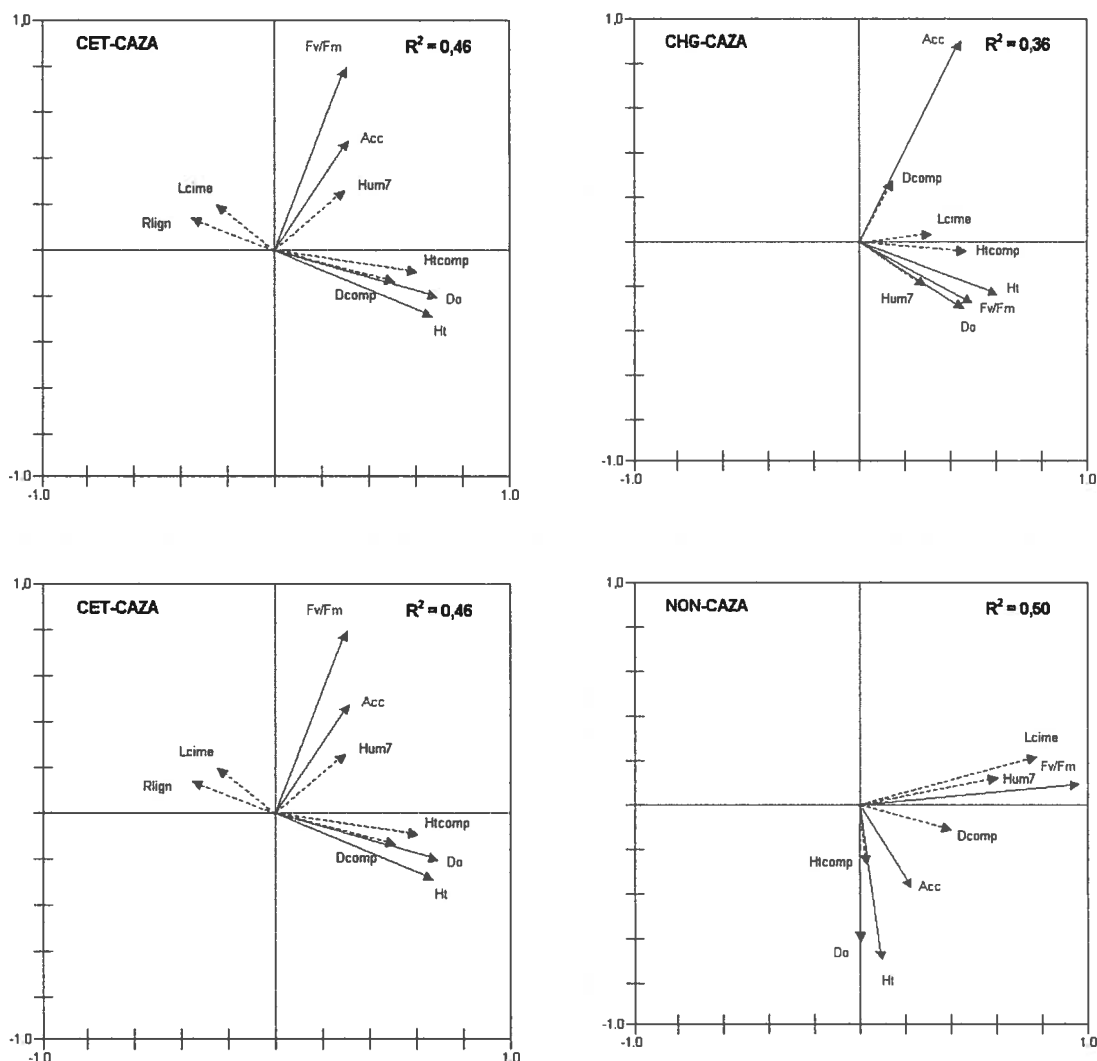
<sup>1</sup> Les rapports hauteur totale/diamètre au collet des plants moyens obtenus qui ne sont pas affectés d'une même lettre sont significativement différentes d'un traitement à l'autre (test de Tukey). L'analyse de variance a été effectuée par espèce et par site.

Caza: dega n=63, acco n=62, trnd n=43 et trsd n=43

Trépanier: dega n=124, acco n=119, trnd n=79 et trsd n=83



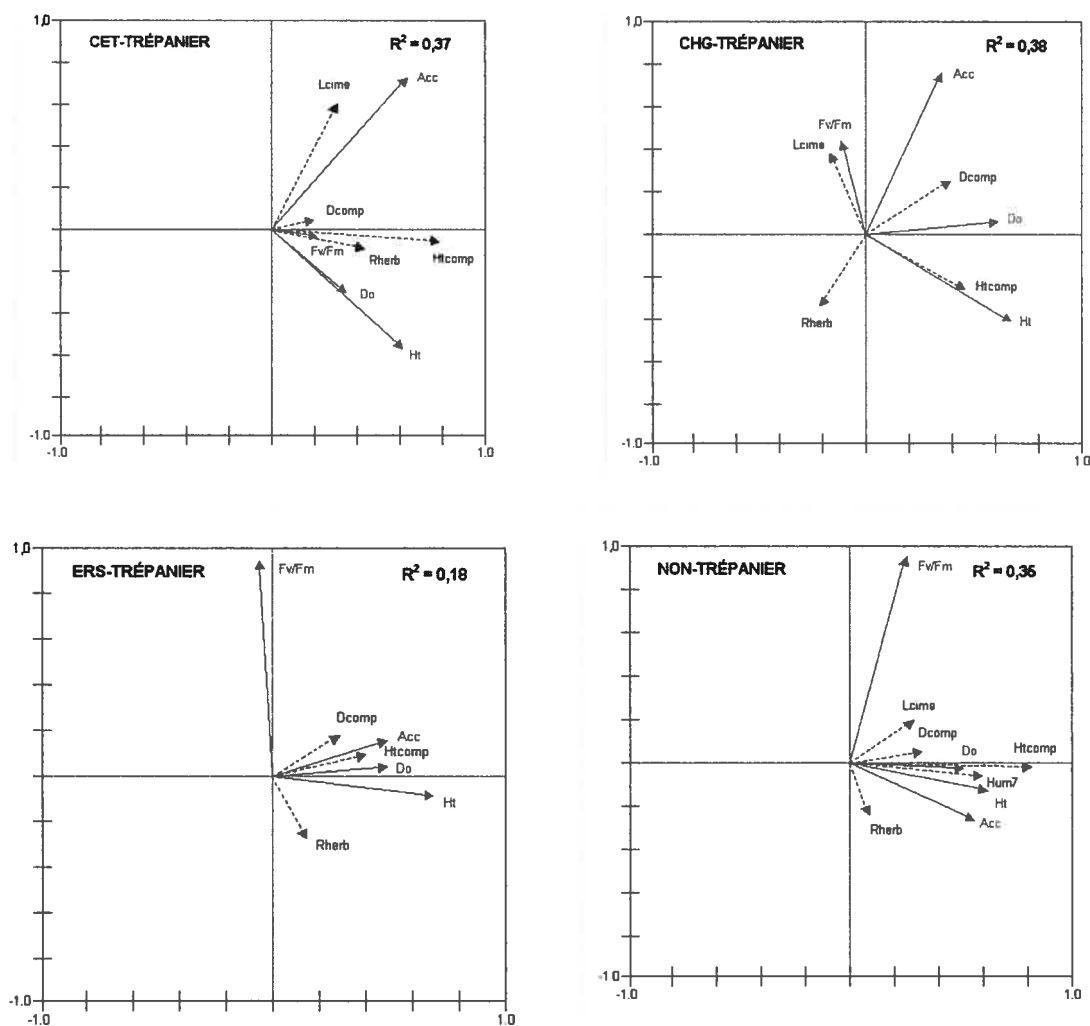
**Figure 15 : Ordinations de la RDA<sub>p</sub> des variables biotiques en fonction des variables environnementales par espèce pour le site Caza**



Le diagramme à double projection représente les variables biotiques par des vecteurs bleus (continus) et les variables environnementales par des vecteurs noirs (pointillés). Les vecteurs des variables environnementales ont été multipliés, sans incidence, par un facteur de deux sur l'ordination afin de permettre une meilleure représentation graphique. Les variables biotiques sont la longueur de la pousse annuelle du plant ( $Acc$ ), le diamètre au collet du plant ( $Do$ ), la hauteur totale du plant ( $H_t$ ) et le rapport  $Fv/Fm$  ( $Fv/Fm$ ). Les variables environnementales, quant à elles, sont la distance moyenne entre la compétition ligneuse et le plant ( $D_{comp}$ ), la hauteur moyenne de la compétition ligneuse ( $H_{tcomp}$ ), l'humidité du sol après sept jours sans pluie ( $Hum7$ ), le % de DFPP à hauteur de la cime du plant ( $L_{cime}$ ), le recouvrement total en espèces herbacées en périphérie du plant ( $R_{herb}$ ) et le recouvrement total en espèces ligneuses en périphérie du plant ( $R_{lign}$ ).



**Figure 16 : Ordinations de la RDA<sub>p</sub> des variables biotiques en fonction des variables environnementales par espèce pour le site Trépanier**



Le diagramme à double projection représente les variables biotiques par des vecteurs bleus (continus) et les variables environnementales par des vecteurs noirs (pointillés). Les vecteurs des variables environnementales ont été multipliés, sans incidence, par un facteur de deux sur l'ordination afin de permettre une meilleure représentation graphique. Les variables biotiques sont la longueur de la pousse annuelle du plant (Acc), le diamètre au collet du plant (Do), la hauteur totale du plant (Ht) et le rapport Fv/Fm (Fv/Fm). Les variables environnementales, quant à elles, sont la distance moyenne entre la compétition ligneuse et le plant (Dcomp), la hauteur moyenne de la compétition ligneuse (Htcomp), l'humidité du sol après sept jours sans pluie (Hum7), le % de DFPP à hauteur de la cime du plant (Lcime), le recouvrement total en espèces herbacées en périphérie du plant (Rherb) et le recouvrement total en espèces ligneuses en périphérie du plant (Rlign).

